



# Università degli Studi di Genova

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti

---

## Tesi di Dottorato in

Ingegneria dei Modelli, delle Macchine e dei Sistemi per l'Energia,  
l'Ambiente e i Trasporti

Curriculum: Ingegneria Matematica, Strategica e Simulazione

# Analisi Termoenergetica e Modellazione Parametrica di Serre Verticali Adattive

## Relatori:

Prof. Ing. Luca TAGLIAFICO  
Prof. Patrizia BAGNERINI

## Dottorando:

Antonio DE DONNO

## Correlatore:

Prof. Mauro GAGGERO

Anno Accademico 2024–2025

# Indice

|          |                                                                                              |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>                                                                          | <b>3</b>  |
| 1.1      | L'agricoltura moderna . . . . .                                                              | 3         |
| 1.2      | Contesto di riferimento dell'agricoltura verticale . . . . .                                 | 7         |
| 1.3      | La serra verticale adattiva, una nuova prospettiva . . . . .                                 | 12        |
| <b>2</b> | <b>Confronto Termoeconomico tra Serra Verticale Adattiva e Tradizionale</b>                  | <b>14</b> |
| 2.1      | Parametri dello studio . . . . .                                                             | 14        |
| 2.2      | Sistema di climatizzazione . . . . .                                                         | 16        |
| 2.2.1    | Impianto frigorifero . . . . .                                                               | 18        |
| 2.2.2    | OFF Design Ciclo frigorifero . . . . .                                                       | 23        |
| 2.3      | Modello di Calcolo . . . . .                                                                 | 23        |
| 2.3.1    | Termodinamica dell'aria umida . . . . .                                                      | 23        |
| 2.3.2    | Modello di traspirazione . . . . .                                                           | 26        |
| 2.3.3    | Bilanci energetici e di massa . . . . .                                                      | 29        |
| 2.4      | Carichi termici e igrometrici . . . . .                                                      | 35        |
| 2.5      | Risultati delle simulazioni Termoeconomiche . . . . .                                        | 43        |
| 2.5.1    | Analisi di variazione dello Scheduling VF . . . . .                                          | 43        |
| 2.6      | Consumo energetico per il condizionamento climatico . . . . .                                | 45        |
| <b>3</b> | <b>Identificazione parametrica White-box dei coefficienti per la stima del LAI nelle AVF</b> | <b>50</b> |
| 3.1      | Introduzione all'identificazione White-Box . . . . .                                         | 50        |
| 3.1.1    | Ottimizzatore fmincon . . . . .                                                              | 51        |
| 3.2      | Approssimazioni del LAI e modello White-Box per l'identificazione .                          | 53        |
| 3.3      | Risultati Numerici dell' Identificazione . . . . .                                           | 55        |

|          |                                                                                         |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Modulo AVF come Sistema di Supporto Vitale nello Spazio</b>                          | <b>63</b>  |
| 4.1      | Introduzione ai sistemi di supporto vitale . . . . .                                    | 63         |
| 4.2      | Microclimatizzazione e Recupero del Condensato . . . . .                                | 67         |
| 4.2.1    | Sistema di Microclimatizzazione . . . . .                                               | 69         |
| 4.3      | Simulazioni e Risultati . . . . .                                                       | 70         |
| <b>5</b> | <b>Confronto Termoenergetico tra Serre Adattive Piane e Serre Piane Tradizionali</b>    | <b>77</b>  |
| 5.1      | Modello EP: Geometria, materiali e coltura . . . . .                                    | 79         |
| 5.2      | Modello di Evapotraspirazione Serre Piane: Carichi termici e Tecniche passive . . . . . | 81         |
| 5.2.1    | Modello EP: Analisi radiazione solare . . . . .                                         | 82         |
| 5.2.2    | Modello EP: Analisi evapotraspirazione . . . . .                                        | 84         |
| 5.3      | Risultati modello: confronto evapotraspirazione . . . . .                               | 90         |
| 5.4      | Risultati modello: effetto tecniche passive e andamenti orari . . . . .                 | 92         |
| 5.5      | Risultati modello: confronto serra adattiva e serra tradizionale . . . . .              | 94         |
| 5.6      | Risultati modello: conclusioni . . . . .                                                | 95         |
| <b>6</b> | <b>Conclusioni</b>                                                                      | <b>100</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>                                                                     | <b>103</b> |

# Elenco delle figure

|      |                                                                                                                                                                                       |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Coltivazione in campo aperto . . . . .                                                                                                                                                | 4  |
| 1.2  | Coltivazione in serra tradizionale . . . . .                                                                                                                                          | 4  |
| 1.3  | Vertical farm . . . . .                                                                                                                                                               | 5  |
| 1.4  | Schema di una coltivazione idroponica [1] . . . . .                                                                                                                                   | 6  |
| 1.5  | Schema di una coltivazione aeroponico [1] . . . . .                                                                                                                                   | 7  |
| 1.6  | Schema di una coltivazione acquaponica [2] . . . . .                                                                                                                                  | 7  |
| 1.7  | Numero annuale di articoli scientifici sull'agricoltura verticale [3]. . .                                                                                                            | 9  |
| 1.8  | Confronto tra produzione in campo aperto, produzione in serra e agricoltura verticale in termini di consumo idrico, resa dei raccolti e distanza percorsa dagli alimenti [4]. . . . . | 11 |
| 2.1  | Concetto di rack AVF ( <b>in basso</b> ) e confronto con VF ( <b>in alto</b> ). . . .                                                                                                 | 17 |
| 2.2  | Impianto di climatizzazione. . . . .                                                                                                                                                  | 17 |
| 2.3  | Processo termodinamico dell'aria umida nel sistema di climatizzazione senza deumidificazione [5] . . . . .                                                                            | 19 |
| 2.4  | Processo termodinamico dell'aria umida nel sistema di climatizzazione con deumidificazione [5] . . . . .                                                                              | 19 |
| 2.5  | Ciclo frigo rappresentato sul piano Pressione-Entalpia . . . . .                                                                                                                      | 21 |
| 2.6  | Andamento del COP dell'impianto frigo durante il terzo ciclo di coltivazione . . . . .                                                                                                | 24 |
| 2.7  | Diagramma ASHRAE . . . . .                                                                                                                                                            | 26 |
| 2.8  | Scambio di massa ed energia nella serra. . . . .                                                                                                                                      | 33 |
| 2.9  | Operazioni svolte dall'algoritmo. . . . .                                                                                                                                             | 34 |
| 2.10 | Variazione dell'altezza della lattuga in base al tempo di coltivazione, esclusa la fase di germinazione. . . . .                                                                      | 35 |
| 2.11 | Evoluzione dell'altezza variabile su ciascun ripiano della scaffalatura durante il periodo di coltivazione. . . . .                                                                   | 36 |
| 2.12 | Variazione dell'area coltivata nel sistema AVF durante il periodo di coltivazione. . . . .                                                                                            | 37 |



|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.13 | Variazione temporale della media giornaliera dell'indice di assorbimento della luce ( <i>LAI</i> ) della lattuga durante il periodo di coltivazione. . . .                                                                                                                                | 38 |
| 2.14 | Termico carichi nei sistemi VF e AVF al 32° giorno di coltivazione. . .                                                                                                                                                                                                                   | 39 |
| 2.15 | Confronto di carichi termici specifici in VF e AVF: <b>(a)</b> Carico termico specifico della radiazione LED sul suolo. <b>(b)</b> Carico derivante dalla radiazione riflessa dalle foglie. <b>(c)</b> Confronto dei carichi sensibili. <b>(d)</b> Confronto dei carichi latenti. . . . . | 40 |
| 2.16 | Media giornaliera dell'indice di area fogliare con diverse soluzioni di programmazione durante il periodo di coltivazione. . . . .                                                                                                                                                        | 41 |
| 2.17 | Confronto tra flusso termico dei LED e portata del vapore nel sistema AVF. <b>(a)</b> Calore Flusso dissipato dai LED nell'AVF e nell'area coltivata. <b>(b)</b> Portata del vapore traspirato in condizioni di illuminazione e oscurità. . . . .                                         | 42 |
| 2.18 | Leaf area index della lattuga (escluso il periodo di germinazione) su un ciclo di coltivazione. . . . .                                                                                                                                                                                   | 45 |
| 2.19 | Confronto del consumo energetico nei sistemi AVF e VF in diversi scenari di programmazione: <b>(a)</b> Riscaldamento. <b>(b)</b> Illuminazione artificiale. <b>(c)</b> Raffreddamento e deumidificazione. . . . .                                                                         | 47 |
| 2.20 | Consumi energetici in AVF e VF con diverse strategie di programmazione su 6 cicli di coltivazione. . . . .                                                                                                                                                                                | 48 |
| 3.1  | Approssimazione del <i>LAI</i> con diverse curve: polinomiale (in alto a sinistra), somma dei seni (in alto a destra), somma delle tangenti iperboliche (in basso a sinistra), funzione di base radiale (in basso a destra) con diverso numero di coefficienti . . . . .                  | 56 |
| 3.2  | Percentuale di riempimento dell'AVF . . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 57 |
| 3.3  | Confronto tra i parametri sperimentali e i valori stimati con modello white-box p11: <b>(a)</b> temperatura [°C], <b>(b)</b> umidità relativa [%], <b>(c)</b> portata d'aria [kg/s]. . . . .                                                                                              | 59 |
| 3.4  | Andamento del coefficiente $x_1$ del <i>LAI</i> (approssimazione polinomiale) ad ogni iterazione dell'ottimizzazione . . . . .                                                                                                                                                            | 61 |
| 3.5  | Andamento della funzione costo $J(X)$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 62 |
| 4.1  | Prototipo della serra verticale adattiva spaziale sviluppato da Space V, spinoff dell'Università di Genova. . . . .                                                                                                                                                                       | 64 |
| 4.2  | Struttura del prototipo della serra verticale adattiva. . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 65 |
| 4.3  | Esperimenti di coltivazione in ambito spaziale. . . . .                                                                                                                                                                                                                                   | 66 |
| 4.4  | Render di un modulo AVF spaziale . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 68 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5  | Sistema di microclimatizzazione . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 70 |
| 4.6  | Andamento della Temperatura all'immissione nel modulo AVF . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                          | 71 |
| 4.7  | Andamento dell'altezza delle piante nel tempo . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                      | 72 |
| 4.8  | Portata d'aria elaborata dal sistema di climatizzazione . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                            | 73 |
| 4.9  | Andamento del volume condizionato . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 74 |
| 4.10 | Andamento dei consumi del riscaldatore . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                             | 74 |
| 4.11 | Temperatura dell'acqua di raffreddamento (in arancione) e dew point dell'aria (in blu) . . . . .                                                                                                                                                                                                                             | 75 |
| 4.12 | Acqua condensata sulla cold plate in ogni ora del giorno (Fotoperiodo=16h) . . . . .                                                                                                                                                                                                                                         | 76 |
| 4.13 | Litri di acqua recuperata per singolo ciclo di coltivazione in un vano confrontata su diversi fotoperiodi . . . . .                                                                                                                                                                                                          | 76 |
| 5.1  | Serra adattiva caratterizzata da cielo mobile, mostrata a tempi di crescita delle colture differenti. . . . .                                                                                                                                                                                                                | 78 |
| 5.2  | Sketch delle due serre a confronto. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 80 |
| 5.3  | Distribuzione percentuale di radiazione esterna che giunge al suolo di una serra tradizionale . . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 83 |
| 5.4  | Distribuzione percentuale di radiazione esterna che giunge al suolo di una serra adattiva . . . . .                                                                                                                                                                                                                          | 84 |
| 5.5  | NDLI in assenza di LED integrativi . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 85 |
| 5.6  | Portata di evapotraspirazione oraria per il primo giorno del mese [mm/h] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 89 |
| 5.7  | Portata media giornaliera per i mesi di Gennaio ( <i>LAI</i> 3) . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                    | 90 |
| 5.8  | Portata media giornaliera per i mesi di Dicembre ( <i>LAI</i> 3) . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                   | 91 |
| 5.9  | Effetto del <i>LAI</i> (serra tradizionale) . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                        | 91 |
| 5.10 | Confronto attività evapotraspirante ( <i>LAI</i> 2) nel mese di gennaio . . . . .                                                                                                                                                                                                                                            | 92 |
| 5.11 | Confronto attività evapotraspirante su m <sup>3</sup> di volume condizionato in serra piana e adattiva ( <i>LAI</i> 2) nel mese di gennaio . . . . .                                                                                                                                                                         | 93 |
| 5.12 | Effetto della ventilazione meccanica sui carichi termici . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                           | 94 |
| 5.13 | Riduzione carichi raffrescamento . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 95 |
| 5.14 | Confronto kWh/day m <sup>2</sup> (dicembre), in blu il carico sensibile di riscaldamento della serra adattiva e in verde tratteggiato il carico latente di raffreddamento; in arancione il carico sensibile di riscaldamento della serra tradizionale e in giallo tratteggiato il carico latente di raffreddamento . . . . . | 96 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.15 | Confronto kWh/day m <sup>2</sup> (agosto), in blu il carico sensibile di raffreddamento della serra adattiva e in verde tratteggiato il carico latente di raffreddamento; in arancione il carico sensibile di raffreddamento della serra tradizionale e in giallo tratteggiato il carico latente di raffreddamento | 97 |
| 5.16 | Differenza percentuale tra i kWh termici/day totali (sensibile+latente) della serra tradizionale ed adattiva . . . . .                                                                                                                                                                                             | 98 |

# Abstract

Secondo le previsioni delle Nazioni Unite, entro il 2050 la popolazione mondiale dovrebbe raggiungere i 9,7 miliardi di persone, di cui il 70% risiederà in aree urbane, mentre la disponibilità di terreni coltivabili continuerà a diminuire. L'agricoltura verticale (VF) offre una strada promettente per la produzione alimentare urbana sostenibile, utilizzando lo spazio verticale e ambienti controllati. Tra gli approcci emergenti, l'agricoltura verticale adattiva (AVF) introduce sistemi di scaffalature mobili che si adattano alle fasi di crescita delle piante, consentendo di ospitare un numero maggiore di ripiani di coltivazione all'interno della stessa altezza di scaffale. In questo studio, abbiamo sviluppato un modello computazionale per quantificare e confrontare il consumo energetico dei sistemi AVF e VF convenzionali in condizioni su scala industriale. Lo scenario di riferimento ha preso in considerazione 272 rack multilivello, ciascuno con 8 ripiani nel VF e 15 ripiani nell'AVF, con *Lactuca sativa* come coltura di prova. Il consumo energetico per il controllo termoigrometrico e l'illuminazione è stato stimato in base a diversi programmi di semina, con le dinamiche di crescita delle colture simulate utilizzando algoritmi di programmazione. I carichi termici delle piante sono stati calcolati attraverso il modello Penman-Monteith, consentendo una stima affidabile dell'evapotraspirazione e del suo impatto sul controllo del clima interno. I risultati della simulazione mostrano che l'AVF raggiunge una riduzione media del 22% del consumo energetico specifico per il controllo del clima rispetto al VF, indipendentemente dalle strategie di semina. Inoltre, l'AVF raddoppia quasi il numero di ripiani di coltivazione a parità di ingombro, aumentando la superficie coltivabile di oltre il 400% rispetto ai tradizionali sistemi indoor piatti. La seconda parte dello studio è incentrata sull'identificazione parametrica White-Box dei coefficienti numerici del Leaf Area Index ( $LAI$ ) un parametro fondamentale per la modellazione agronomica e termoeconomica di un sistema serra. Sono state valutate diverse curve per approssimare l'andamento del  $LAI$ . Dopo una presentazione al problema di ottimizzazione da risolvere

si è analizzato il confronto delle performance di approssimazione delle diverse curve. I risultati migliori si ottengono con la somma di seni a 60 coefficienti e con le funzioni in base radiale a 40 coefficienti, con una minimizzazione della funzione costo e del tempo di calcolo. La fase successiva dello studio analizza brevemente lo sviluppo di un modulo AVF come sistema di supporto vitale per coltivazioni nelle stazioni spaziali. Dopo un breve excursus sulle possibili limitazioni presenti in ambienti ostili come la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) si sono svolte delle simulazioni termoeenergetiche con un sistema di microclimatizzazione semplificato e si è indagata la possibilità del recupero del condensato attraverso uno scambiatore di calore "cold plate" raffreddato dal canale dell'acqua di raffreddamento della stazione. E' interessante notare come un singolo modulo AVF di superficie 25x25cm consenta di recuperare da 0.45L a 0.64L d'acqua per singolo ciclo di coltivazione, in funzione del fotoperiodo in gioco. Infine si è svolto uno studio comparativo dei fabbisogni energetici di una serra piana tradizionale e di una serra piana adattiva. Dopo un'analisi del modello di calcolo per l'evapotraspirazione e delle condizioni al contorno, si sono svolte simulazioni termoeenergetiche per la valutazione dei carichi termici in gioco e dei fabbisogni energetici dei due sistemi. Questo studio ha evidenziato come la serra adattiva si dimostri una tecnologia utile per lo sviluppo di colture in ambiente controllato consentendo una diminuzione dei fabbisogni di energia primaria del 27% a dicembre e del 20% a gennaio. Il presente studio fornisce la prima valutazione quantitativa delle prestazioni energetiche di serre adattive in configurazione verticale e piana. I risultati dimostrano come tali sistemi permettano di ottimizzare contestualmente l'uso del suolo e l'intensità energetica, favorendo l'integrazione dell'agricoltura verticale nel tessuto urbano e offrendo una strategia efficace per la riconversione delle serre tradizionali in sistemi adattivi ad alta efficienza.

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 L'agricoltura moderna

Oggi l'agricoltura si fonda su diverse tecniche che combinano produttività, sostenibilità e innovazione tecnologica. Tra le più diffuse vi è l'agricoltura intensiva, caratterizzata da elevato uso di fertilizzanti chimici, pesticidi, irrigazione e macchinari per massimizzare la resa per ettaro; tuttavia, questo modello porta a costi ambientali significativi, come l'inquinamento del suolo e dell'acqua [6]. Parallelamente, si afferma sempre più l'agricoltura conservativa (o “no-till”), che limita l'arieggiamento del terreno per preservarne la struttura e ridurre l'erosione: in Italia, circa il 5 % delle colture annuali è gestito con tecniche no-till [7]. Un'altra strategia molto rilevante è l'agricoltura di precisione, che sfrutta sensori, droni, GPS e big data per ottimizzare l'uso delle risorse (fertilizzanti, acqua, pesticidi) e minimizzare gli sprechi — in Italia, secondo l'ISTAT, il 28,5% delle aziende utilizza già queste tecniche [8].

Negli ultimi anni sono cresciute anche le coltivazioni in ambiente controllato, come l'idroponica (piante coltivate in soluzioni nutritive senza suolo) e il vertical farming (coltivazioni su più piani all'interno di edifici). Questi sistemi, pur richiedendo molta energia elettrica, permettono un uso molto efficiente dell'acqua e evitano pesticidi: ad esempio, negli impianti indoor il 58,3 % del mercato è rappresentato oggi proprio dall'idroponica [9].

Le tecniche di agricoltura controllata rappresentano una delle evoluzioni più avanzate dell'agricoltura di precisione. Esse si basano su ambienti chiusi o semi-chiusi in cui tutte le variabili agronomiche (luce, acqua, nutrienti, temperatura, umidità,  $CO_2$ ) sono monitorate e regolate mediante sistemi digitali, sensori IoT e automazioni. Questi approcci permettono un uso estremamente efficiente delle risorse, produzioni stabili e la possibilità di coltivare in aree urbane o non agricole.



Figura 1.1: Coltivazione in campo aperto



Figura 1.2: Coltivazione in serra tradizionale





Figura 1.3: Vertical farm

Il **Vertical farming** è la tecnica più rappresentativa della Controlled Environment Agriculture (CEA). Consiste nella coltivazione su più livelli verticali, spesso all'interno di edifici, serre multilivello o container agricoli. Le caratteristiche principali sono:

- Illuminazione con LED a spettro regolabile
- Ricircolo idrico chiuso con perdite minime
- Nessun uso di pesticidi
- Sensori per monitoraggio in tempo reale
- Elevata densità produttiva per metro quadrato

È molto utilizzata per orticole a ciclo breve (lattughe, basilico, baby leaf, micro-greens).

La coltivazione **Idroponica** è un sistema in cui le piante crescono senza suolo, con le radici immerse in una soluzione nutritiva calibrata digitalmente. Punti di forza:

- Riduzione del consumo d'acqua fino al 90%
- Controllo totale dei nutrienti



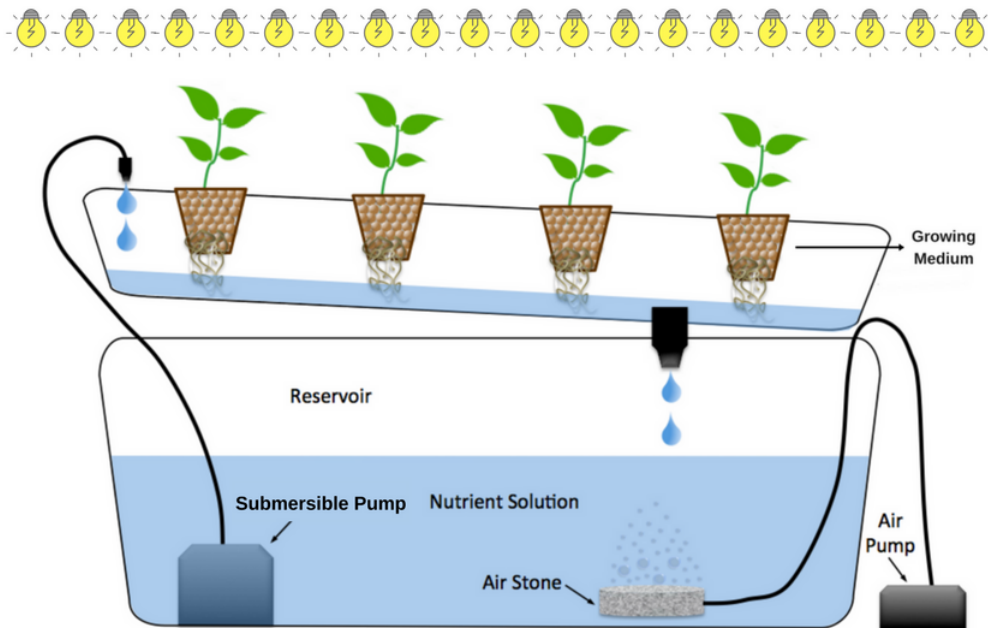


Figura 1.4: Schema di una coltivazione idroponica [1]

- Assenza di patogeni del suolo

Grazie a questo sistema si possono controllare dei parametri essenziali come il pH, necessario per ottimizzare i processi di scambio tra le radici e i nutrienti presenti in soluzione, la conducibilità elettrica della soluzione, importante per garantire la concentrazione nutritiva adeguata, il tutto per garantire prodotti di qualità con proprietà organolettiche costanti su tutta la coltivazione.

L'**Aeroponica** è una tecnica ancora più avanzata dell'idroponica in cui le radici sono sospese in aria e nebulizzate con una soluzione nutritiva. Vantaggi:

- Ossigenazione massima
- Crescita molto rapida
- Efficienza idrica elevatissima

Tuttavia, la coltivazione in ambiente confinato, (chiuso) non sterile, umido e caldo, in presenza di nutrienti, ed in assenza o in carenza di irraggiamento solare diretto a funzione sterilizzatrice, rischia l'insorgenza sporadica di infestazioni batteriche o micotiche

L'**Acquaponica** integra allevamento ittico e idroponica: i pesci producono nutrienti e fertilizzano le piante, le piante filtrano l'acqua e puliscono l'ambiente dei

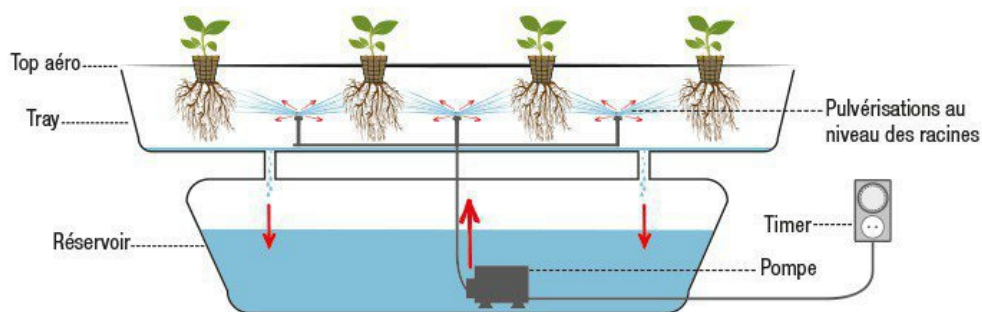


Figura 1.5: Schema di una coltivazione aeroponica [1]

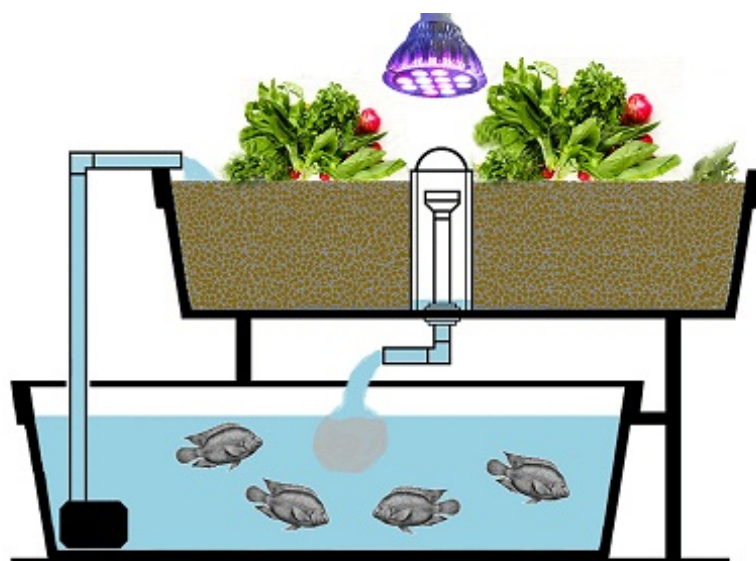


Figura 1.6: Schema di una coltivazione acquaponica [2]

pesci. È un sistema circolare a sprechi quasi zero, ottimo per progetti di sostenibilità e produzioni locali integrate.

## 1.2 Contesto di riferimento dell'agricoltura verticale

L'agricoltura verticale, una nuova forma di agricoltura caratterizzata dalla coltivazione di prodotti agricoli in strati sovrapposti verticalmente all'interno di un ambiente chiuso, sta ricevendo crescente attenzione grazie al suo potenziale nel rispondere alle sfide critiche della sostenibilità nel nostro mondo in rapida urbanizzazione [10]. Grazie all'impiego di tecniche agricole avanzate come l'idroponica e l'aeroponica e alla

sostituzione della luce solare naturale con fonti di luce artificiale, l'agricoltura verticale rappresenta un approccio trasformativo alla produzione alimentare [11]. L'efficienza dell'agricoltura verticale nell'utilizzo dello spazio è una delle sue caratteristiche più significative. A differenza dei metodi agricoli convenzionali, l'agricoltura verticale può produrre raccolti sostanziali in spazi limitati, rendendola così una potenziale soluzione per l'agricoltura urbana. Inoltre, contribuisce anche alla riduzione della deforestazione e del degrado del suolo, diminuendo la dipendenza da terreni agricoli estesi. La capacità dell'agricoltura verticale di facilitare la produzione agricola durante tutto l'anno, indipendentemente dai limiti stagionali, può potenzialmente aumentare la resa per area, superando quella dell'agricoltura tradizionale. L'agricoltura verticale è sempre più vista non solo come un'innovazione agricola, ma anche come un potenziale motore di trasformazione urbana. Uno studio recente suggerisce che l'integrazione dell'agricoltura verticale nei quadri di pianificazione urbana, attraverso strategie di pianificazione alimentare urbana e infrastrutture multifunzionali, può sostenere obiettivi di sostenibilità più ampi [12]. Inoltre, la sua intrinseca efficienza idrica e l'ambiente protettivo, che ripara le colture dalle avversità climatiche e dai parassiti, sono caratteristiche notevoli che possono contribuire a pratiche agricole sostenibili. Le serre verticali stanno guadagnando sempre più attenzione come soluzione sostenibile per l'agricoltura urbana, grazie alla loro capacità di ottimizzare lo spazio e ridurre l'uso delle risorse naturali. Questa tendenza si riflette nel numero crescente di articoli scientifici sottoposti a revisione paritaria pubblicati ogni anno. In particolare, una ricerca bibliometrica condotta in Scopus (area tematica: Ingegneria; anni: 2011-2024), utilizzando "vertical farm" come parola chiave nei titoli, negli abstract e nelle parole chiave degli autori, mostra un aumento costante del numero di pubblicazioni, come illustrato nella Figura 1.7.

Recenti studi sull'atteggiamento dei consumatori italiani mostrano un crescente interesse per i sistemi alimentari sostenibili, con l'agricoltura verticale percepita positivamente per i suoi vantaggi ambientali e di sicurezza. Tuttavia, la diffusione su larga scala è ostacolata dalla scarsa conoscenza dei consumatori, dalle preoccupazioni relative ai costi e dalla concorrenza di prodotti più consolidati come quelli locali e biologici [13]. Il lavoro di Chalabi [14] analizza punti chiave quali l'impronta di carbonio dell'agricoltura verticale, le opportunità e gli ostacoli verso una maggiore diffusione e l'ubicazione/progettazione. Il percorso verso un'implementazione su larga scala dell'agricoltura verticale non è privo di ostacoli. Gli elevati costi iniziali di installazione, il significativo fabbisogno energetico [15], la limitata varietà di colture, i requisiti di competenze tecniche e il potenziale impatto di un ambiente completamente artificiale

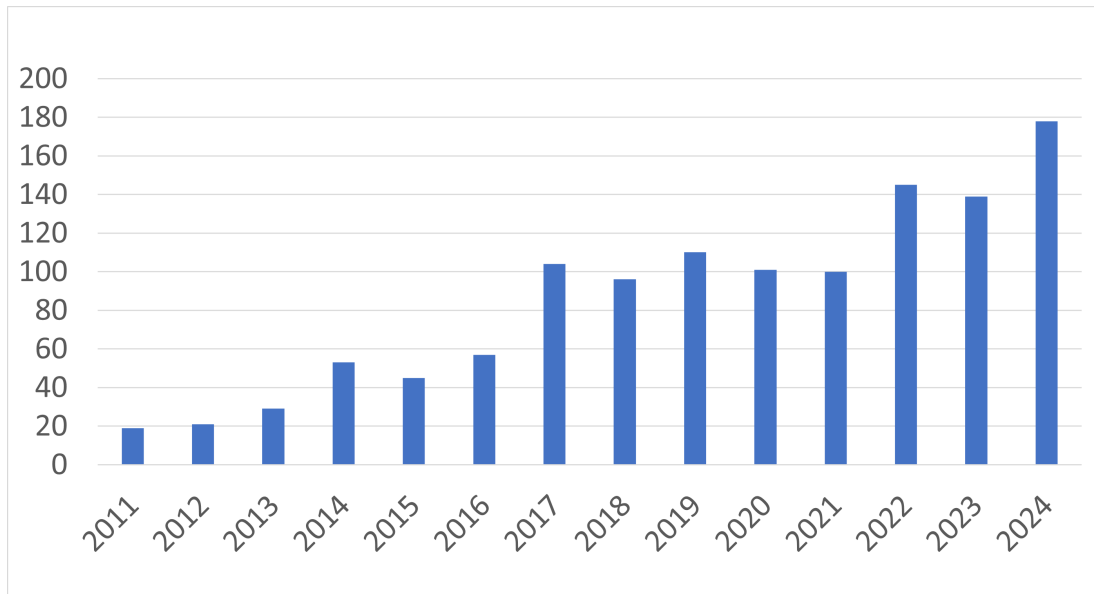


Figura 1.7: Numero annuale di articoli scientifici sull'agricoltura verticale [3].

sulla nutrizione e sul gusto delle colture rappresentano tutte sfide sostanziali. Tuttavia, secondo un recente studio di Arabzadeh et al. [16], l'integrazione dell'agricoltura verticale urbana nel sistema energetico della città può portare a un notevole risparmio sui costi dell'elettricità, con una riduzione che varia dal 5% al 30%, a seconda della variabilità dei prezzi dell'elettricità durante il giorno. In particolare, la flessibilità nella gestione dell'illuminazione, grazie al controllo della risposta alla domanda (DR), consente di evitare le ore di punta, con un conseguente maggiore risparmio, soprattutto per le piante con periodi di illuminazione più brevi. Mentre la comunità globale si impegna a favore di un'agricoltura urbana sostenibile, l'agricoltura verticale appare come un percorso promettente, anche se complesso. Cossu et al. [17] hanno esplorato l'integrazione dell'agricoltura verticale nei sistemi agrivoltaici chiusi (CA), dimostrando che la VF può aumentare significativamente la produttività del terreno fino a 13 volte rispetto ai sistemi CA tradizionali. Questo miglioramento è stato accompagnato da una riduzione del 12% delle emissioni di CO<sub>2</sub> e da un aumento della produttività del terreno, con un rapporto di equivalenza del terreno (LER) fino a 1,60 per le varietà verdi. I risultati suggeriscono che l'agricoltura verticale può non solo migliorare l'efficienza energetica, ma anche aumentare i raccolti, a condizione che vengano utilizzate tecnologie avanzate come il controllo dinamico dell'illuminazione. Nel loro lavoro [18], Stanghellini e Katzin sottolineano che, sebbene l'agricoltura verticale (VF) offra vantaggi quali un ridotto consumo di acqua (Figura 1.8), emissioni chimiche quasi nulle e la possibilità di produrre vicino ai consumatori, le sue credenziali ambientali

non sono illimitate. In particolare, l'uso dei LED al posto della luce solare può essere vantaggioso in termini di produzione controllata, ma implica anche un elevato consumo energetico, che può compromettere i benefici ambientali. Le serre verticali offrono vantaggi significativi in termini di sostenibilità ambientale rispetto all'agricoltura convenzionale. In Giappone, uno studio condotto nella prefettura di Miyagi ha dimostrato che la sostituzione degli ortaggi importati con la produzione VF ha ridotto l'impronta di azoto e fosforo rispettivamente del 37% e del 36%, contribuendo così a ridurre l'inquinamento idrico e a migliorare l'autosufficienza alimentare regionale [19]. Inoltre, l'agricoltura verticale si è dimostrata efficace nella ricostruzione agricola post-catastrofe e rappresenta una soluzione resiliente nelle aree soggette a disastri naturali. Un altro aspetto cruciale dell'agricoltura verticale riguarda la capacità di determinare con precisione il momento ottimale per il raccolto. Questo aspetto diventa particolarmente complesso in contesti industriali, dove colture diverse vengono trapiantate in giorni diversi e, di conseguenza, raggiungono la maturità in momenti diversi. Una gestione accurata di queste differenze è essenziale per garantire l'efficienza operativa, la qualità dei prodotti e la riduzione degli sprechi. Il riconoscimento automatico delle fasi di crescita e maturazione è fondamentale per ottimizzare le operazioni di coltivazione indoor. Diversi studi hanno dimostrato che l'elaborazione delle immagini combinata con modelli di deep learning può migliorare l'accuratezza nell'identificazione di frutti o foglie in diverse fasi di sviluppo. Ad esempio, Wang et al. hanno sviluppato un modello YOLO-BLBE [20] in grado di distinguere con elevata precisione i mirtilli in diverse fasi di maturazione, raggiungendo un'accuratezza superiore al 96%. Sebbene questo lavoro si concentri sulla frutta, i principi metodologici possono essere trasferiti anche alla lattuga e ad altre specie, dove il monitoraggio non riguarda la maturazione dei frutti, ma piuttosto la valutazione dello sviluppo vegetativo e il momento ottimale per la raccolta. Un'altra sfida nell'agricoltura verticale è l'automazione della gestione delle piante, in particolare il trapianto delle piantine nei ripiani e negli scaffali di coltivazione. Questo processo richiede attualmente una navigazione e un posizionamento precisi in ambienti interni privi di GPS, dove i metodi SLAM convenzionali sono soggetti a derive durante le operazioni a lungo termine. I recenti progressi, come il framework preciseSLAM che integra LiDAR, IMU e sensori a ultrasuoni, hanno dimostrato una precisione di posizionamento inferiore al decimetro nelle fabbriche di piante [21], suggerendo direzioni promettenti. Tuttavia, il trapianto robotico completamente automatizzato e affidabile nell'agricoltura verticale rimane una questione aperta. Tuttavia, la sostenibilità a lungo termine dipende dalla capacità di integrare questi sistemi con le condizioni ambientali locali e ottimizzare l'uso delle

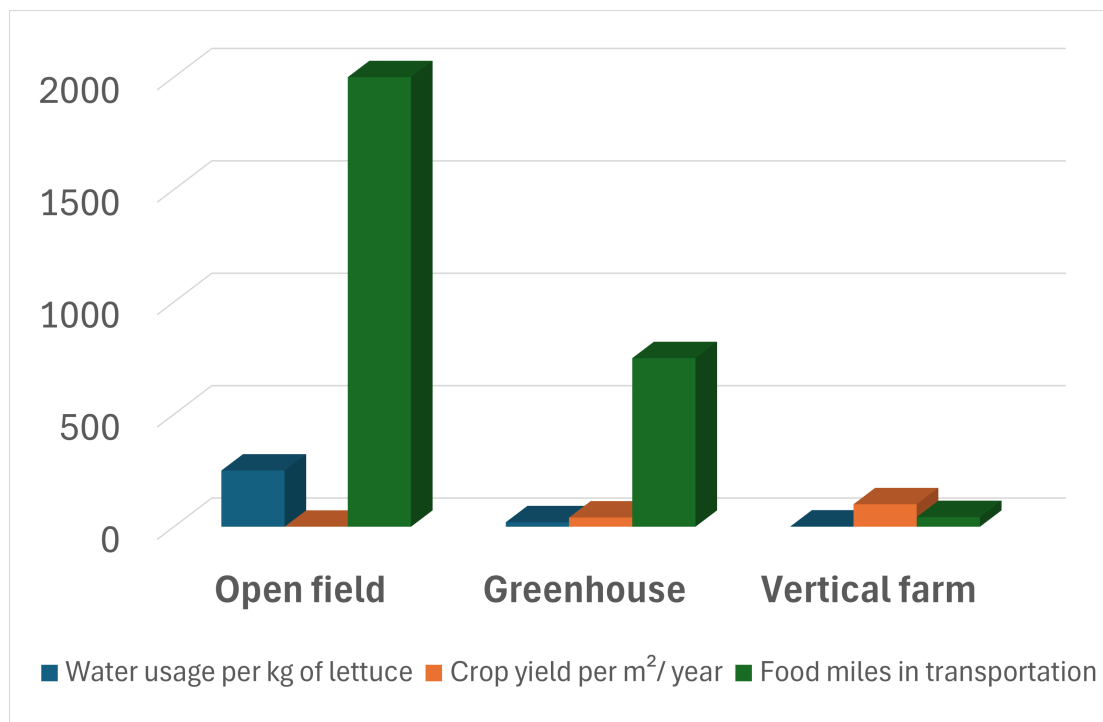


Figura 1.8: Confronto tra produzione in campo aperto, produzione in serra e agricoltura verticale in termini di consumo idrico, resa dei raccolti e distanza percorsa dagli alimenti [4].

risorse. Blom et al. [22] hanno condotto una valutazione quantitativa dell'impronta di carbonio della coltivazione di lattuga in diversi sistemi agricoli, tra cui aziende agricole in campo aperto, serre con terreno, serre idroponiche e agricoltura verticale (VF) nei Paesi Bassi. I risultati hanno mostrato che l'impronta di carbonio della VF (8,177 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) era significativamente più alta di quella delle coltivazioni in campo aperto (0,490 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg), delle serre con terreno (1,211 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) e delle serre idroponiche (1,451 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg). Lo studio prende in considerazione anche scenari alternativi per migliorare l'impronta di carbonio, come l'uso di energie rinnovabili, imballaggi identici e la contabilizzazione dei cambiamenti nell'uso del suolo. Con questi scenari, l'impronta del VF si riduce a 1,797 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg, ancora superiore agli altri sistemi ma con un notevole miglioramento. Gran parte dell'impronta di carbonio del VF è dovuta al consumo di elettricità, in particolare dall'illuminazione artificiale. Lo studio ha rilevato che, sebbene l'agricoltura verticale offra vantaggi rispetto all'agricoltura convenzionale, non è ancora una soluzione sostenibile in termini di impronta di carbonio. Per diventare più sostenibili, le serre verticali devono ridurre drasticamente il consumo energetico e migliorare l'uso dei materiali.

### 1.3 La serra verticale adattiva, una nuova prospettiva

In [23, 24, 25, 26], è stato proposto un nuovo concetto di serra verticale, denominato serra verticale adattiva (AVF), basato sulla possibilità di adattare lo spazio verticale disponibile alla crescita delle colture [27]. L'innovazione alla base della serra adattiva è la sua caratteristica di adattabilità alla crescita delle piante. Mentre in una serra verticale tradizionale i ripiani di coltivazione sovrapposti mantengono una distanza fissa durante tutto il ciclo di sviluppo delle colture, nell'AVF l'altezza dei ripiani di coltivazione è adattabile alle diverse fasi di sviluppo delle colture. La gestione intelligente della posizione dei ripiani di coltivazione assegna automaticamente alle piante solo il volume condizionale di cui hanno realmente bisogno durante la loro crescita. Poiché durante gran parte del loro sviluppo iniziale le piante si trovano in una fase di crescita che richiede poco spazio, il continuo "adattamento intelligente" del posizionamento dei ripiani della serra adattiva consente alle piante di condividere gli stessi volumi durante le diverse fasi di crescita. Pertanto, la serra adattiva consente di inserire più ripiani nello stesso volume rispetto a una serra a ripiani fissi, aumentando così notevolmente la resa produttiva. In condizioni ottimali, l'AVF fornisce un aumento della produzione medio del 108%, rispetto a una serra verticale tradizionale dello stesso volume [23, 24], ma può aumentare a seconda del tipo di colture e dei parametri della serra [25]. Inoltre, il sistema di ventilazione e microcondizionamento può essere personalizzato per ogni ripiano di coltivazione, al fine di coltivare contemporaneamente anche specie vegetali molto diverse tra loro [27].

In uno studio condotto dall'Università di Bologna [28], è stato dimostrato che il guadagno derivante da un investimento in tale tecnologia in uno scenario comparativo di una serra verticale adattiva che occupa 1500 m<sup>2</sup> in 10 anni è di circa il 200% rispetto a una serra verticale tradizionale (VF) delle stesse dimensioni. Un'ipotesi preliminare dello studio [28] è che il consumo energetico per la climatizzazione delle serre, in relazione alla superficie coltivata, sia lo stesso per entrambi i tipi di serra. Tuttavia, non esistono studi che confrontino quantitativamente il consumo tra serre verticali standard e adattive. L'aumento della superficie coltivabile reso possibile dallo spostamento dei ripiani del sistema AVF comporterebbe una diminuzione del volume d'aria nel sistema e, allo stesso tempo, un aumento della quantità di vapore traspirato dalle piante e del carico latente associato. Per questi motivi, la serra adattiva potrebbe comportare un consumo di climatizzazione superiore rispetto a una serra tradizionale.

Lo scopo del presente lavoro è colmare questa lacuna sviluppando un modello di calcolo termoenergetico per le serre verticali al fine di effettuare un confronto tra il consumo energetico delle VF e delle AVF e quantificare l'impatto energetico dei sistemi AVF. In particolare, in questo studio viene presentato un confronto in termini di consumo energetico tra i due tipi di serra sopra menzionati mediante calcoli quantitativi del consumo energetico di ciascun impianto di climatizzazione. Inoltre, per la VF, vengono simulate tre diverse strategie di programmazione della semina per capire se e in che misura influenzano le prestazioni energetiche. I calcoli dei carichi termoigrometrici per entrambi i sistemi vengono effettuati per progettare i componenti degli impianti di climatizzazione ad aria. I sistemi sono costituiti dagli stessi componenti, accuratamente dimensionati per entrambe le serre. In entrambi i casi viene utilizzato lo stesso algoritmo di controllo per garantire un confronto equo.

Infine, vengono calcolati i parametri specifici di consumo energetico riferiti alla superficie coltivata sia per le serre VF che per quelle AVF. Il presente documento è strutturato come segue. Il capitolo 2 fornisce una descrizione delle caratteristiche geometriche dei sistemi AVF e VF, insieme a uno schema del sistema di climatizzazione utilizzato per entrambi. Il capitolo 2.3 riporta il modello computazionale utilizzato per stimare le portate di vapore traspirato dalle piante e i carichi termici all'interno del volume di controllo. Inoltre, vengono presentati i bilanci energetici e di massa, implementati nel codice Matlab, necessari per calcolare le condizioni di immissione dell'aria nel sistema oltre ai carichi termici e i valori di umidità elaborata dall'impianto come risultato delle simulazioni con l'algoritmo definito nel capitolo precedente. Nel capitolo 2.5 sono riportati i risultati di una serie di simulazioni termoenergetiche adottando diverse strategie di semina in entrambe le serre. Nel capitolo 3 si è svolto uno studio di identificazione parametrica dei coefficienti delle curve di leaf area index (*LAI*). Il capitolo 6 contiene le osservazioni conclusive.



## Capitolo 2

# Confronto Termoenergetico tra Serra Verticale Adattiva e Tradizionale

### 2.1 Parametri dello studio

Il presente lavoro mira a confrontare una serra verticale tradizionale (VF) e una serra verticale adattiva (AVF). Nello scenario considerato, la VF è composta da 272 scaffali multilivello. Ogni scaffale comprende 8 ripiani di coltivazione sovrapposti, raggiungendo un'altezza totale di 6,5 m. Con un ingombro al suolo di 2,05 m<sup>2</sup> per scaffale, ogni ripiano offre 2,04 m<sup>2</sup> di superficie coltivabile effettiva. Tra ogni coppia di scaffali sono previsti corridoi di passaggio e di lavorazione larghi 1,2 m per garantire l'accessibilità. Complessivamente, il sistema può ospitare 2176 ripiani di coltivazione, corrispondenti a una superficie coltivabile totale di 4439 m<sup>2</sup>. Nel caso della tecnologia adattiva, ogni scaffale, grazie al sistema di scaffalature mobili, può ospitare 15 ripiani di coltivazione nella stessa altezza totale di 6,5 m. L'ingombro rimane di 2,05 m<sup>2</sup> per scaffale, ma ogni ripiano offre 1,79 m<sup>2</sup> di superficie coltivabile. Complessivamente, il sistema adattivo ospita 4080 ripiani di coltivazione, con una superficie coltivabile totale di 7303 m<sup>2</sup>. Nonostante il sistema adattivo abbia il 14 % in meno di superficie coltivabile rispetto al sistema convenzionale (a causa della presenza dei sistemi di movimentazione dei ripiani), l'applicazione della tecnologia adattiva comporta un aumento di circa il 65% della superficie coltivabile totale per ripiano multilivello. Come mostrato nella tabella 2.1, la serra adattiva aumenta ulteriormente la superficie coltivabile a parità di quantità di terreno. Nel VF, durante questo lavoro saranno analizzati diversi scenari: semine coeve e diverse strategie di programmazione. L'AVF richiede programmi di semina attentamente pianificati per sfruttare appieno il

Tabella 2.1: Confronto tra sistema tradizionale (VF) e sistema adattivo (AVF) in termini di superficie coltivata.

| Feature                              | VF                  | AVF                 |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Shelves per rack                     | 8                   | 15                  |
| Shelf surface                        | 2.04 m <sup>2</sup> | 1.79 m <sup>2</sup> |
| Total shelves                        | 2176                | 4080                |
| Cultivable area                      | 4439 m <sup>2</sup> | 7303 m <sup>2</sup> |
| Floor area                           | 1358 m <sup>2</sup> | 1358 m <sup>2</sup> |
| Increase for the same amount of land | +226%               | +437%               |

principio di adattamento e massimizzare la resa complessiva. Dato il maggior numero di ripiani che occupano lo stesso spazio verticale rispetto a un VF tradizionale, la semina simultanea di tutti i ripiani porterebbe al superamento della capacità totale in altezza della struttura della serra prima che le colture raggiungano la fase di raccolta. Pertanto, le piantine vengono trapiantate in giorni diversi, al fine di sfruttare al meglio lo spazio disponibile e massimizzare il numero di ripiani in un singolo scaffale. Di conseguenza, le semine nel sistema AVF non sono coeve. La fase di germinazione viene gestita separatamente in una camera climatica e dura 14 giorni. Il confronto verrà effettuato su una serie di 6 cicli di coltivazione della durata di 21 giorni con la stessa camera climatica di dimensioni adeguate.

Ridurre lo spreco di suolo è e sarà sempre più importante con il passare degli anni. La crescita della popolazione mondiale richiede un aumento della produzione alimentare, ma lo spreco di suolo riduce la disponibilità di terreni agricoli. Nel loro lavoro, Huang et al. [29] hanno dimostrato come l'urbanizzazione abbia un'influenza significativa sulla superficie dei terreni agricoli, tanto che un aumento dell'1% della popolazione urbana è associato a una diminuzione del 3% dei terreni agricoli. Utilizzando il suolo in modo più efficiente e sostenibile, è possibile massimizzare la produzione alimentare e garantire la sicurezza alimentare per tutti. Il suolo è anche un ambiente di vita per numerosi organismi, tra cui batteri, funghi, insetti e microrganismi [30]. L'eccessivo spreco di suolo può portare alla distruzione degli habitat naturali e alla perdita di biodiversità. Il suolo svolge anche un ruolo chiave nel ciclo dell'acqua, trattenendo l'acqua piovana e ricaricando le falde acquifere. Ridurre lo spreco di suolo aiuta a conservare le risorse idriche e a mitigare le sfide legate all'acqua. Il suolo può anche fungere da serbatoio di carbonio, trattenendo grandi quantità di CO<sub>2</sub> atmosferico. Lo spreco di suolo può portare alla perdita di carbonio dal suolo, contribuendo all'aumento

delle emissioni di gas serra e all'effetto serra. L'ottimizzazione dell'uso del suolo è una questione fondamentale al giorno d'oggi.

Tuttavia, l'energia necessaria per il controllo del clima in questi sistemi non è trascurabile. Uno dei principali problemi delle serre verticali è, infatti, il costo energetico per la gestione climatica dell'ambiente. In una serra adattiva, è essenziale che questo costo, in relazione alla superficie coltivata, non sia superiore a quello di una VF, poiché annullerebbe l'effetto positivo dell'aumento della superficie a parità di terreno occupato e dell'aumento della resa produttiva. La figura 2.1 mostra il concetto di un sistema verticale adattivo.

## 2.2 Sistema di climatizzazione

Una possibile configurazione per il sistema di climatizzazione è il sistema HVAC, particolarmente adatto alla gestione dei carichi termici sensibili e latenti. In considerazione dello scopo dello studio, ovvero determinare il consumo medio dell'AVF, non sono state implementate configurazioni di sistema particolarmente complesse (come recuperatori o unità di miscelazione dell'aria). La configurazione del sistema di climatizzazione proposto è illustrata nella Figura 2.2. Le linee nere rappresentano l'aria trattata, la linea rossa il fluido di trasferimento del calore del ciclo di refrigerazione (R134a in questo modello) e la linea blu i flussi d'acqua. L'aria passa attraverso l'evaporatore di un refrigeratore, che funge da deumidificatore per ridurre il contenuto igrometrico esterno e garantire condizioni di ingresso ottimali. Successivamente, è presente un riscaldatore per riportare l'aria alla temperatura appropriata. Prima del riscaldatore, è possibile prevedere uno scambiatore di calore intermedio a piastre alettate in controcorrente per recuperare il calore residuo dell'aria in uscita dalla serra. Infine, è presente una batteria di umidificazione che aumenta il contenuto igrometrico dell'aria atomizzando l'acqua prelevata da un apposito serbatoio con atomizzatori.

Tutti questi componenti, opportunamente coordinati da un'unità di controllo e da appositi sensori, sono essenziali per trattare l'aria in entrata e portarla alle condizioni di ingresso necessarie per mantenere la serra alle condizioni termoigrometriche ideali per la crescita delle piante. L'unità di controllo è essenziale per la regolazione e la gestione autonoma del sistema di climatizzazione. L'unità elabora i dati raccolti da una serie di sensori situati nella serra, all'esterno (per i parametri di temperatura e umidità) e sull'evaporatore del ciclo di refrigerazione (per la temperatura della parete). Questi sensori comunicano con l'unità di controllo attraverso controlli periodici, consentendo al sistema HVAC di regolare dinamicamente le condizioni operative (temperatura

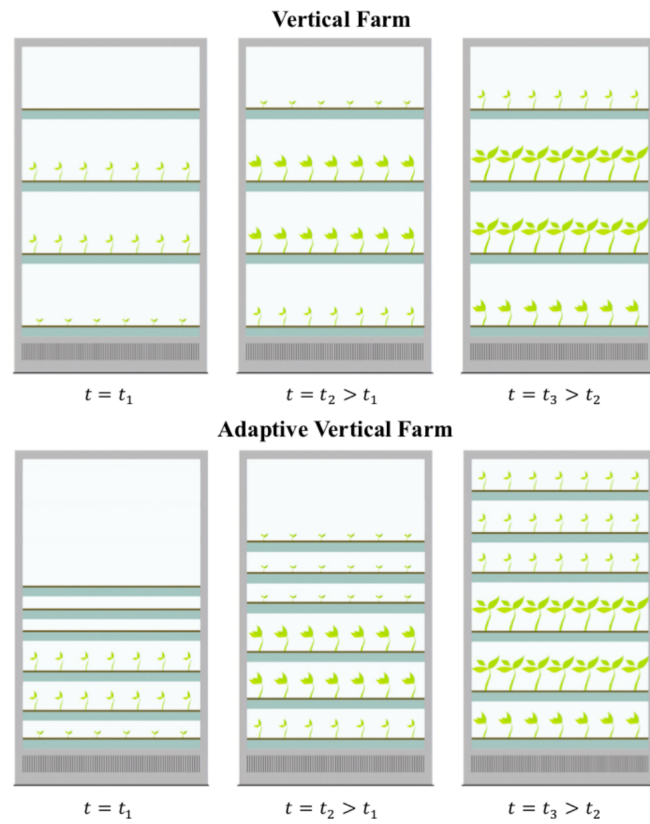


Figura 2.1: Concetto di rack AVF (in basso) e confronto con VF (in alto).

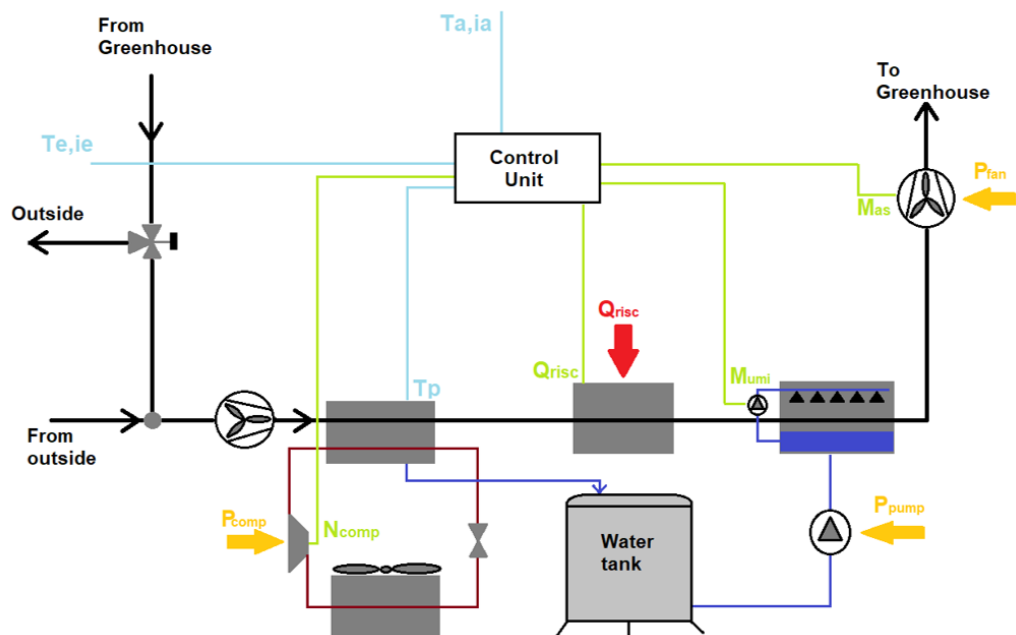


Figura 2.2: Impianto di climatizzazione.

di ingresso e umidità relativa) per mantenere i parametri dell'aria entro intervalli favorevoli alla crescita delle piante. La metodologia dettagliata adottata per calcolare le condizioni termoigrometriche di ingresso per l'alimentazione dell'aria è descritta nel capitolo 2.3. Le linee verdi nella Figura 2.2 rappresentano i segnali di regolazione e le linee blu rappresentano i segnali di rilevamento.

Nelle figure successive si può osservare quello cosa accade fisicamente all'aria umida sul diagramma psicrometrico in due esempi di condizioni termodinamiche. In Figura 2.3 l'aria entra nell'impianto di climatizzazione alla temperatura di 13 °C e con umidità relativa del 30%. Essendo l'aria ad un valore di umidità assoluta inferiore a quello desiderato alle condizioni di immissione, non è richiesto il processo di deumidificazione. Di conseguenza l'aria subirà il riscaldamento sensibile nel riscaldatore (tratto 1-2) e infine il processo di umidificazione adiabatica nell'umidificatore (tratto 2-3). Va specificato che il punto finale sul diagramma ASHRAE non combacia con le condizioni di set point dell'aria all'interno della serra. Questo coinciderà con le condizioni di immissione calcolate dai bilanci di energia e di massa, per garantire che le condizioni termoigrometriche di set point vengano mantenute. In Figura 2.4 l'aria in immissione all'impianto di climatizzazione ha temperatura 30°C e umidità relativa 70%. In questo caso il valore di umidità assoluta dell'aria esterna è nettamente superiore a quello delle condizioni da garantire all'immissione in serra. Di conseguenza è necessario ridurre il contenuto igrometrico con il processo di deumidificazione (tratto 1-2). In questo processo l'aria viene spinta sulle lamelle dell'evaporatore del ciclo frigo mostrato in Figura 2.2. Essendo che la temperatura di parete dello scambiatore è inferiore al punto di rugiada dell'aria umida in ingresso, l'umidità in essa contenuta inizierà a condensare, abbassando il contenuto igrometrico e la temperatura dell'aria stessa. Una volta raggiunto il grado igrometrico desiderato, l'aria viene poi spinta nel riscaldatore (tratto 2-3) dove subisce il processo di riscaldamento sensibile fino a raggiungere le condizioni di immissione (punto 3).

### 2.2.1 Impianto frigorifero

Per il dimensionamento dell'impianto inverso a compressione di vapore si è scelto l'r134a come fluido refrigerante e si è assunto un gradiente di temperatura all'evaporatore di 8°C e al condensatore di 12°C, con un rendimento isoentropico di compressione pari a 0.7.

$$\Delta T_{eva} = T_p - T_{eva} \quad (2.1)$$

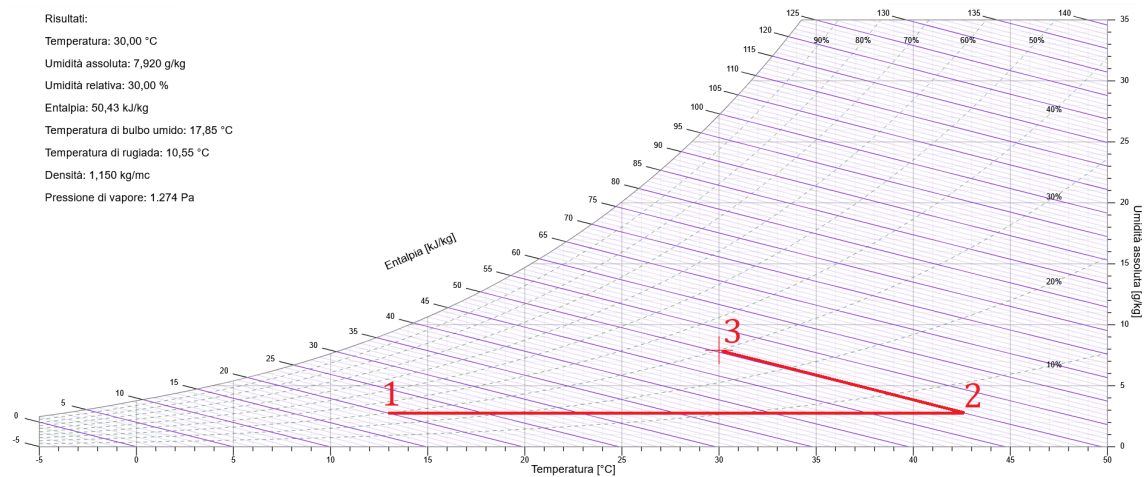


Figura 2.3: Processo termodinamico dell'aria umida nel sistema di climatizzazione senza deumidificazione [5]

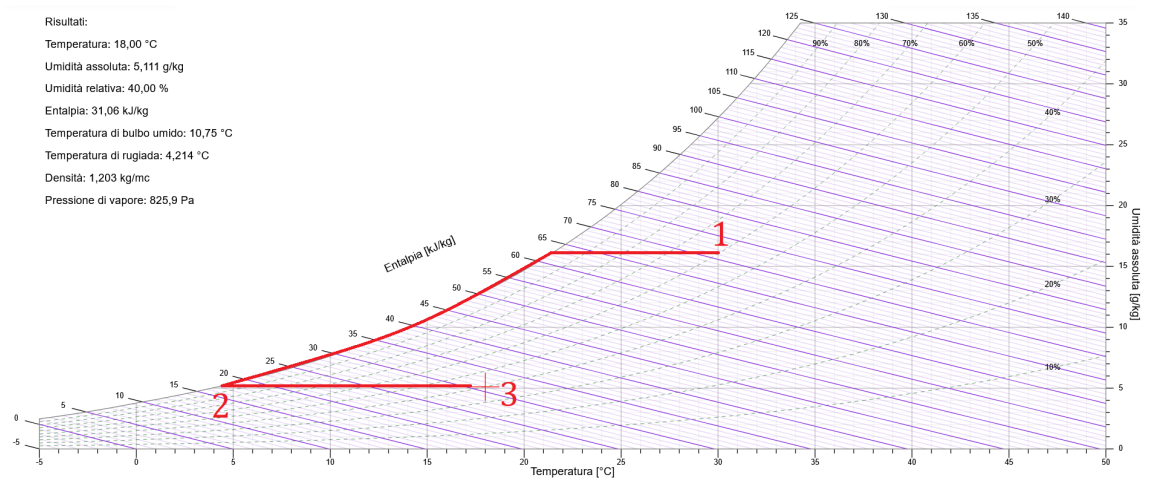


Figura 2.4: Processo termodinamico dell'aria umida nel sistema di climatizzazione con deumidificazione [5]

Dall'equazione 2.1, è possibile ricavare la  $T_{eva}$ . Allo stesso modo, dall'equazione 2.2 si può ricavare la  $T_{cond}$ .

$$\Delta T_{cond} = T_{cond} - T_e \quad (2.2)$$

Note le temperature di estremità del ciclo termodinamico si può procedere a trovare i quattro punti fondamentali per il calcolo delle prestazioni del ciclo frigo.

I 4 punti del ciclo frigo sono definiti come:

- Punto 1, ingresso compressore a titolo 1 e alla temperatura dell'evaporatore;
- Punto 2, ingresso al condensatore nelle condizioni di vapore surriscaldato;
- Punto 3, ingresso alla valvola di laminazione (ipotizzando titolo 0 e pressione del condensatore);
- Punto 4, alla pressione di saturazione del punto 1 ed entalpia del punto 3 (laminazione isoentalpica).

Per ricavare il punto 2 si parte prima dal punto 2 isoentropico. Quest'ultimo si ottiene alla pressione del punto 3 con l'entropia ricavata dal punto 1. Stabilito il punto 2 isoentropico è possibile calcolare l'entalpia del punto 2 dall'equazione:

$$\eta_{is} = \frac{h_2(is) - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.3)$$

Di conseguenza il punto 2 si troverà incrociando  $h_2$  e  $p_3$ .

Una volta noti i punti del ciclo termodinamico si può calcolare il COP di riferimento come:

$$COP = \frac{h_4 - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.4)$$

Infine si può ricavare la potenza del compressore del ciclo frigorifero come segue:

$$P_{comp} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{COP} \quad (2.5)$$

Per conoscere il flusso termico scambiato dal condensatore si usa l'equazione:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{COP} + \dot{Q}_{eva} \quad (2.6)$$

Per il dimensionamento degli scambiatori del ciclo frigo si andrà a calcolare il coefficiente globale di scambio termico come segue:

$$KA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \quad (2.7)$$

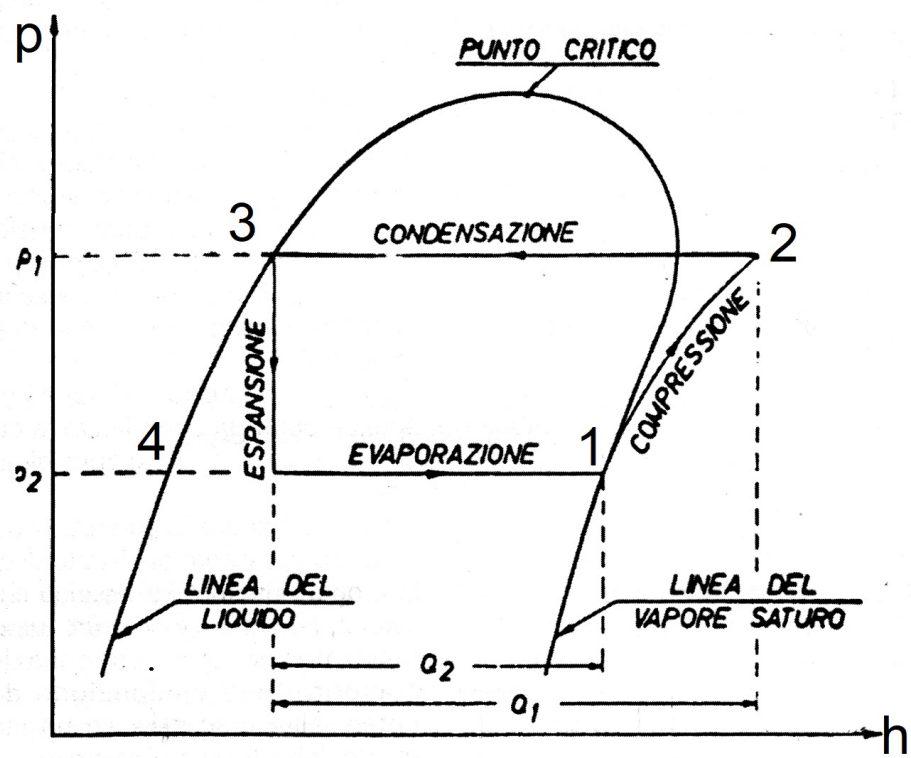


Figura 2.5: Ciclo frigo rappresentato sul piano Pressione-Entalpia



Dai calcoli di dimensionamento, considerando i picchi del carico  $\dot{Q}_{eva}$  si è ottenuto un  $KA_{eva}$  di  $6.7 \cdot 10^5$  W/k ed un  $KA_{cond}$  di  $4.8 \cdot 10^5$  W/k, con una potenza del compressore richiesta di  $1.5 \cdot 10^5$  MW.

Il soddisfacimento di un carico termico ( $\dot{Q}_{eva}$ ) di picco pari a 5.7 MW per una struttura serricola industriale impone il superamento dei limiti dimensionali delle singole unità frigorifere standard, orientando la progettazione verso una configurazione a centrale termo-frigorifera modulare.

Sebbene esistano sul mercato chiller centrifughi di singola unità in grado di raggiungere potenze nell'ordine dei 5-10 MW (solitamente impiegati nel teleriscaldamento o nei grandi data center), la loro applicazione in ambito HVAC agricolo risulta tecnicamente ed economicamente inefficiente per tre ragioni principali:

- Frazionamento del carico: Le serre presentano un'elevata variabilità del carico termico e latente. Una singola macchina di grande taglia opererebbe spesso a carichi parziali con un drastico calo dell'efficienza (COP). L'impiego di una batteria di 6-8 unità indipendenti da 800-1000 kW ciascuna permette invece una regolazione "a gradini", attivando solo la potenza strettamente necessaria.
- Distribuzione aeraulica: Data la portata d'aria necessaria, l'impiego di uno scambiatore unico comporterebbe perdite di carico insostenibili e velocità dell'aria dannose per le colture. La soluzione tecnologica d'elezione prevede l'accoppiamento di più Unità di Trattamento Aria (HVAC) distribuite, ciascuna dotata di batterie di evaporazione dimensionate sui parametri di KA calcolati.
- Affidabilità (Ridondanza): In un contesto produttivo industriale, il fermo macchina di un unico generatore da 6 MW comporterebbe la perdita totale del raccolto in poche ore. La modularità garantisce la continuità operativa anche in caso di manutenzione o guasto di un singolo circuito.

Si precisa che la presente analisi si configura come uno studio energetico preliminare, finalizzato alla quantificazione dei fabbisogni termici e frigoriferi della struttura serricola in diverse condizioni climatiche. Pertanto, la modellazione del sistema di generazione del freddo è stata condotta a un livello di astrazione funzionale, definendo i parametri operativi del ciclo termodinamico (gradienti di temperatura all'evaporatore e al condensatore) necessari a garantire il controllo termo-igrometrico richiesto dalle colture.

## 2.2.2 OFF Design Ciclo frigorifero

Per il calcolo delle prestazioni di off-design del ciclo frigorifero si è procede in modo iterativo. Il parametro che varia sarà il carico richiesto per la deumidificazione ( $\dot{Q}_{eva}$ ). Noto il  $KA_{eva}$  calcolato in precedenza si può trovare la temperatura all'evaporatore usando la:

$$\dot{Q}_{eva} = KA_{eva} \cdot (T_p - T_{eva}) \quad (2.8)$$

Ipotizzando un COP di primo tentativo è possibile impostare un algoritmo iterativo per la ricerca del COP effettivo della macchina in off design. Dal  $COP_1$  si ricava la potenza termica scambiata dal condensatore:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{COP} + \dot{Q}_{eva} \quad (2.9)$$

Allo stesso modo, noto il flusso termico al condensatore si può ricavare la  $T_{cond}$ :

$$\dot{Q}_{cond} = KA_{cond} \cdot (T_{cond} - T_e) \quad (2.10)$$

Seguendo lo stesso schema precedente per il calcolo dei punti termodinamici fondamentali (da 1 a 4) del ciclo frigo, una volta noti è possibile ricavare il COP effettivo del ciclo frigorifero con la 2.4. La differenza tra il valore del COP di primo tentativo e quello calcolato ottenendo tutti i punti termodinamici del ciclo costituirà l'errore dell'algoritmo di ottimizzazione, che come tale dovrà essere minimizzato.

$$err = |COP_1 - COP| \quad (2.11)$$

Per fare questo si è impostato un ciclo while per la minimizzazione dell'errore settando come valore soddisfacente  $err < 10^{-3}$ . Alla fine di ogni ciclo il  $COP_1$  viene aggiornato con il  $COP$  calcolato con la 2.4.

In Fig. 2.6 si riporta un andamento del COP della macchina frigorifera durante il terzo ciclo di coltivazione simulato.

## 2.3 Modello di Calcolo

### 2.3.1 Termodinamica dell'aria umida

L'aria atmosferica è una miscela di gas, costituita principalmente da azoto e ossigeno. Viene definita come umida poiché contiene vapor d'acqua. È utile considerare l'aria umida come una miscela di vapore e di aria secca, e tutte le grandezze specifiche sono riferite ai kg di aria secca. Sia l'aria secca sia il vapor d'acqua possono essere

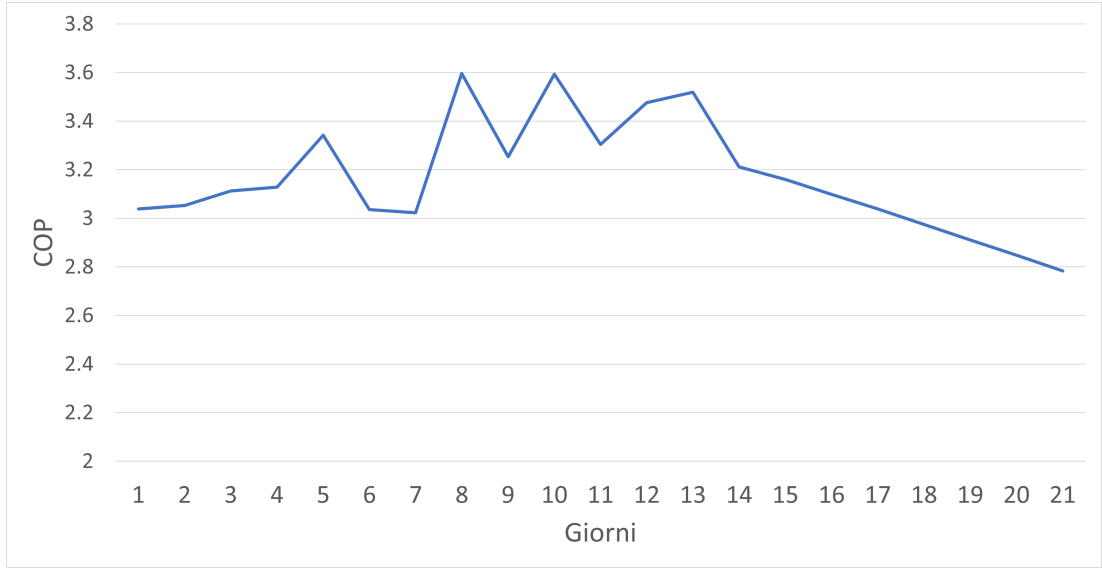


Figura 2.6: Andamento del COP dell'impianto frigo durante il terzo ciclo di coltivazione

considerati con buona approssimazione come gas ideali. Dunque, la pressione dell'aria, valendo la legge di Dalton, è esprimibile come:

$$p_a = p_{as} + p_v \quad (2.12)$$

Le grandezze fondamentali sono:

- L'umidità relativa  $i$ , definita come:

$$i = \frac{m_v}{(m_v)_s} = \frac{p_v}{p_s} \quad (2.13)$$

Dove  $m_v$  è la massa di vapore contenuta nel volume d'aria, mentre  $(m_v)_s$  è la massa di vapore contenuta nelle condizioni di saturazione, ovvero la massima quantità di vapore che l'aria è in grado di trattenere in certe condizioni di temperatura. Essendo gas perfetti, l'umidità relativa è definibile in funzione delle pressioni parziali del vapore. Infine, la temperatura di saturazione, per una certa pressione parziale del vapore, è definita temperatura di rugiada;

- L'umidità specifica  $y$ , definita come il rapporto tra la massa di vapore e la massa di aria secca:

$$y = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (2.14)$$

È possibile ricavare una relazione tra  $y$  e  $i$ . Con riferimento al volume  $V$  del miscuglio e valendo l'ipotesi di gas ideale per l'aria secca e per il vapore:

$$\frac{p_v}{p_{as}} = \frac{m_v}{m_{as}} \cdot \frac{R_v}{R_{as}} \quad (2.15)$$

Ottenendo infine:

$$y = 0.622 \cdot \frac{p_v}{p_{as}} = 0.622 \cdot i \cdot \frac{p_s}{p_{tot} - i \cdot p_s} \quad (2.16)$$

L'entalpia specifica definita come:

$$h_a = h_{as} + y \cdot h_v = c p_{as} \cdot T + y \cdot (r_0 + c p_v \cdot T) \quad (2.17)$$

Utilizzando i valori medi dei calori specifici nel campo di interesse per il condizionamento dell'aria si ottiene:

$$h_a = 1.005 \cdot T + y \cdot (2501 + 1.9 \cdot T) \quad (2.18)$$

Dove, per l'aria secca si è posto il riferimento  $h_{as}=0$  kJ/kg a  $T=0$  °C, mentre per l'entalpia di vapore, si pone  $h_v=0$  kJ/kg alle condizioni del punto triplo liquido saturo ( $T = 0.01C, p = 611Pa, x = 0$ ). L'entalpia  $h_v$  in un punto generico viene calcolata supponendo un processo isobaro nel piano T-s (curva in rosso nella figura sottostante) che porti la massa di acqua satura allo stato di vapore surriscaldato. L'errore di approssimazione è piccolo perché in quella zona del piano le isoentalpiche sono circa orizzontali.

Le proprietà dell'aria umida vengono rappresentate graficamente nel diagramma psicrometrico nella forma elaborata dall'ASHRAE, un esempio è riportato in Figura 2.7 (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditionning Engineers).

Il modello energetico, basato sul calcolo dei carichi termoigrometrici del sistema e utilizzando le equazioni di bilancio energetico e di massa, stima le condizioni ideali di immissione dell'aria trattata per mantenere la temperatura e l'umidità ideali per la crescita delle piante. Il modello si basa sui flussi di energia e di massa considerando i modelli di crescita ed evapotraspirazione della lattuga (*Lactuca sativa* L.).

In letteratura sono disponibili numerosi esempi utili per il calcolo dei contributi dei bilanci energetici e di massa. Il lavoro di Arcasi et al. mostra un esempio di modello per il bilancio energetico [31]. Per calcolare il contributo della traspirazione delle piante, e quindi il bilancio di massa, questo lavoro fa riferimento al modello utilizzato da Graamans et al. [32]. Esistono diversi modelli in letteratura utili per valutare il tasso di traspirazione delle piante. In [33], Stanghellini mostra il modello utile soprattutto per calcolare la traspirazione derivante dalla coltivazione del pomodoro. In [34], Brouwer e Heibloem hanno utilizzato un modello diverso per calcolare il fabbisogno idrico di diverse specie vegetali e la loro evapotraspirazione. Graamans et al. [32] hanno utilizzato il modello di Penman per l'evapotraspirazione [35] per sviluppare

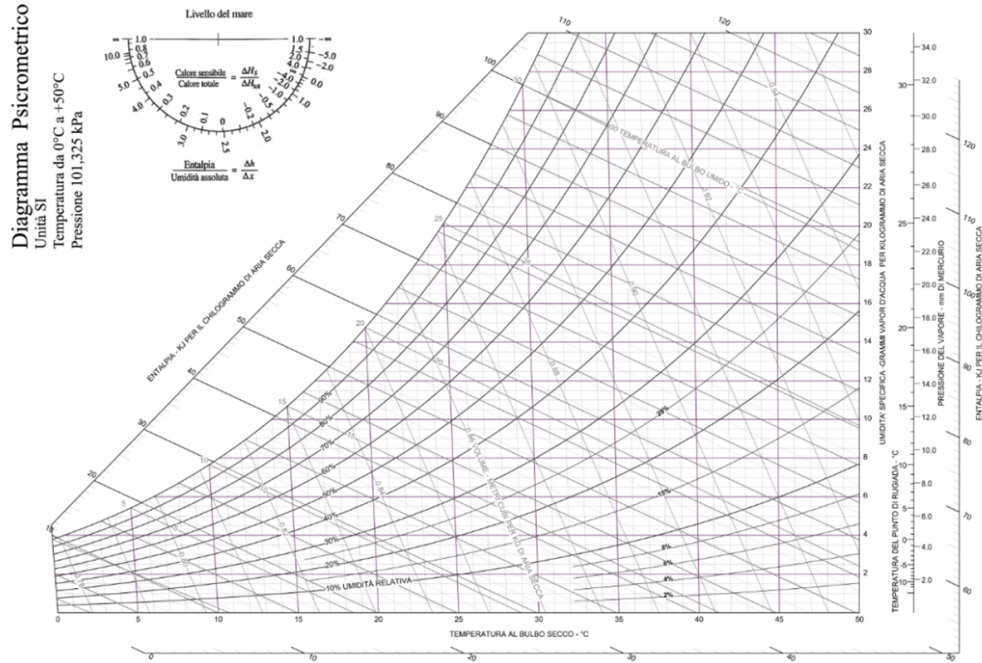


Figura 2.7: Diagramma ASHRAE

e convalidare un modello che descrive i flussi di energia coinvolti nella produzione di lattuga all'interno di sistemi di coltivazione chiusi. Un altro lavoro che utilizza il modello di Penman è quello di Weidner et al. [36], che studia e confronta l'intensità energetica delle migliori pratiche dei sistemi CEA (fabbriche di piante e serre aperte e chiuse) per diverse zone climatiche.

### 2.3.2 Modello di traspirazione

In [37], Arcasi et al. hanno esaminato lo stato dell'arte dei modelli di evapotraspirazione. In questo lavoro, il modello Penman-Monteith è stato utilizzato per calcolare il tasso di traspirazione. Il modello Penman-Monteith (PM) [35] si basa sul presupposto che la chioma tridimensionale delle colture possa essere ridotta a una "grande foglia" unidimensionale [32] in cui viene assorbita la radiazione netta, viene scambiato calore e viene rilasciato vapore acqueo. La foglia assorbe la radiazione (in questo caso, radiazione artificiale prodotta dai LED) e, poiché si trova a una temperatura specifica ( $T_s$ ), scambia un flusso di calore sensibile con l'ambiente. La radiazione fornisce energia alle foglie per svolgere il processo di fotosintesi della clorofilla. L'acqua assorbita dalle piante attraverso le radici sale fino alle foglie e viene emessa nell'ambiente sotto forma di vapore attraverso gli stomi fogliari. L'energia direttamente correlata alla fotomorfogenesi è limitata e può essere considerata trascurabile [38]. In condizioni

stazionarie, il bilancio energetico è

$$R_{net} - Q_{sens} - Q_{lat} = 0 \quad (2.19)$$

dove

- $R_{net}$  è la radiazione assorbita da una foglia ed è una funzione del numero di foglie e della loro disposizione. Può essere espressa come

$$R_{net} = (1 - \rho_o) \cdot PAR \cdot (1 - \exp^{-LAI/1.8})^{0.8} \quad (2.20)$$

dove  $\rho_o$  è il coefficiente di riflessione delle foglie, tipicamente compreso nell'intervallo [0,05–0,08], cfr. [39];  $PAR$  (radiazione fotosinteticamente attiva [40]) [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] è la radiazione disponibile per il processo di fotosintesi; e  $LAI$  è l'indice di area fogliare, un parametro che indica l'area fogliare in relazione all'area coltivata.

$$LAI = \frac{S_{leaf}}{S_{cultivated}} \quad (2.21)$$

- $Q_{sens}$  è il flusso di calore sensibile scambiato tra le foglie e l'ambiente, determinato dal fatto che la temperatura delle foglie  $T_s$  è diversa dalla temperatura dell'aria circostante  $T_a$ . Può essere espresso come

$$Q_{sens} = LAI \cdot \rho_a \cdot Cp_a \cdot \frac{(T_s - T_a)}{r_a} \quad (2.22)$$

dove  $\rho_a$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] è la densità dell'aria valutata a  $T_a$ ,  $Cp_a$  [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ] è il calore specifico dell'aria valutato a  $T_a$ , e  $r_a$  [ $\text{s}/\text{m}$ ] è la resistenza aerodinamica al passaggio del calore e alla diffusione dell'acqua. Per  $r_a$ , Fuchs, rif. [41] ha proposto un metodo che integra il diametro medio delle foglie ( $l$ ), la velocità dell'aria senza ostacoli ( $u_\infty$ ) e  $LAI$ :

$$r_a = 350 \cdot \left( \frac{l}{u_\infty} \right)^{0.5} \cdot LAI^{-1} \quad (2.23)$$

dove  $l$  [ $\text{m}$ ] è la dimensione media della foglia e  $u_\infty$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] è la velocità dell'aria che lambisce la foglia. La resistenza aerodinamica dello strato limite influenza il trasferimento di calore sensibile e vapore acqueo dalla superficie della foglia all'aria circostante. È costituita dalla resistenza al trasferimento di quantità di moto ([42, 43]). È stato dimostrato, ad esempio, da Stanghellini [33], che la traspirazione delle colture dipende solo in misura minima dalla resistenza aerodinamica dello strato limite (come conseguenza del feedback termico). È

tuttavia pratico formulare valori standardizzati per i calcoli preliminari, per semplicità. Per i calcoli predittivi e statici è possibile utilizzare un  $LAI$  di 3 ([44, 45]) e una dimensione media delle foglie di 0,11 m ([46]). In prossimità della superficie fogliare, è preferibile avere basse velocità dell'aria per evitare uno stress meccanico eccessivo. Considerando una velocità dell'aria tra le foglie di 0,15 m/s, otteniamo un valore di  $r_a$  pari a 100 s/m.

- $Q_{lat}$  è il flusso di calore latente dovuto allo scambio di massa dell'acqua tra le foglie e l'aria. Può essere espresso come

$$Q_{lat} = LAI \cdot \lambda \cdot \frac{\chi_s - \chi_a}{r_s + r_a} \quad (2.24)$$

dove  $\lambda$  [kJ/kg] è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua,  $\chi_s$  [g<sub>v</sub>/m<sup>3</sup>] è la concentrazione di vapore nell'aria umida in condizioni di saturazione alla temperatura  $T_s$ ,  $\chi_a$  è la concentrazione di vapore nell'aria umida in condizioni di temperatura  $T_a$  e umidità  $i_a$ , e  $r_s$  è la resistenza dello stoma alla diffusione del vapore, che può essere espressa come [32]

$$r_s = 60 \cdot \frac{1500 + PPFD}{200 + PPFD} \quad (2.25)$$

dove  $PPFD$  [ $\mu$ /m<sup>2</sup>s] è la densità del flusso di fotoni fotosintetici sulla superficie, ovvero i fotoni con lunghezze d'onda nello spettro 400-700 nm. Wang et al. [47] hanno scoperto che diversi rapporti R/B (luce rossa rispetto alla luce blu) influenzano in modo particolare l' $r_s$  della lattuga e illustrano la risposta della conduttanza stomatica all'irraggiamento. Dato il flusso di calore latente  $Q_{lat}$ , la portata dell'acqua evaporata dalle foglie viene calcolata con la formula:

$$\dot{m}_v = \frac{Q_{lat}}{\lambda} \quad (2.26)$$

Per convalidare il modello sono stati utilizzati i risultati sperimentali (Wheeler) riportati in [32]. Nello studio di Wheeler et al. [48], i tassi di evapotraspirazione sono stati registrati quotidianamente e con lo sviluppo della copertura della chioma. I loro dati sono stati trascritti per determinare lo sviluppo della massa secca in relazione alla copertura della chioma. Le simulazioni per la validazione del modello sono state effettuate nelle condizioni termigrometriche dell'esperimento di Wheeler: temperatura dell'aria di 22,5 °C, umidità relativa dell'80% e  $PPFD$  di 293  $\mu$ mol/m<sup>2</sup>s.

Tabella 2.2: Condizioni di set point termoigrometriche e di illuminazione [50].

| Set Point | Temperature<br>(Ta) [°C] | Relative<br>Humidity<br>(ia) | PAR<br>[W/m²] | PPFD<br>[mol/m²s] | Hours |
|-----------|--------------------------|------------------------------|---------------|-------------------|-------|
| Light     | 25                       | 65%                          | 60            | 300               | 16 h  |
| Dark      | 23                       | 75%                          | 0             | 0                 | 8 h   |

### 2.3.3 Bilanci energetici e di massa

Per calcolare le condizioni dell'aria all'ingresso, è necessario eseguire un bilancio energetico e di massa in condizioni di stato stazionario dell'intero sistema. Innanzitutto, è necessario definire le condizioni termoigrometriche per la crescita delle piante. Recenti studi [49] dimostrano che la modellizzazione delle risposte delle colture alla temperatura e al CO<sub>2</sub> (non studiate in questo caso) può guidare gli adeguamenti ambientali in tempo reale, migliorando sia la resa che l'efficienza dei costi. Queste strategie sono in linea con il paradigma AVF, che enfatizza la flessibilità e la reattività del sistema. Nel presente lavoro è stata presa in considerazione la lattuga a foglia piccola, che ha una condizione di set point definita nella tabella 2.2.

È possibile scrivere il bilancio energetico come segue:

$$\dot{Q}_{disp} + \dot{Q}_{lat} + \dot{Q}_{sens} + \dot{R}_{sens} + \dot{R}_{rif} + \dot{Q}_{led} + \dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{as} \cdot (h_a - h_{im}) \quad (2.27)$$

dove i diversi termini rappresentano, rispettivamente, quanto segue:

- $\dot{Q}_{disp}$  è il contributo relativo allo scambio termico attraverso l'involucro della struttura ed è dato da

$$\dot{Q}_{disp} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot A_i \cdot (T_a - T_e) + K_b \cdot A_b \cdot (T_a - T_t) \quad (2.28)$$

dove  $K$  è la trasmittanza termica delle pareti, ipotizzata pari a 0,4 [W/m²K],  $A_i$  è la superficie di dispersione verso l'esterno [m²],  $A_b$  è la superficie di dispersione verso il suolo [m²], e  $n$  è il numero di superfici di dispersione.

- $\dot{Q}_{lat}$  è il contributo relativo all'evapotraspirazione delle piante ed è definito come segue:

$$\dot{Q}_{lat} = LAI \cdot \lambda \cdot A_c \cdot \frac{\chi_s - \chi_a}{r_s + r_a} \quad (2.29)$$

dove  $A_c$  è la superficie coltivata, espressa in m².



- $\dot{R}_{sens}$  è un contributo relativo all'illuminazione artificiale, in particolare al flusso di calore che raggiunge il suolo attraverso la radiazione. Si presume che questo flusso di calore diventi flusso sensibile:

$$\dot{R}_{sens} = PAR \cdot (A_c - A_{bf}) \quad (2.30)$$

dove  $A_{bf}$  è una porzione di  $A_c$  coperta dalla chioma, espressa in  $m^2$ .

- $\dot{R}_{rif}$  è un altro contributo relativo all'illuminazione a LED; si riferisce al flusso di calore che, arrivando sulle foglie attraverso la radiazione, viene riflesso dalla superficie fogliare ed è dato da

$$\dot{R}_{rif} = \rho_0 \cdot PAR \cdot A_c \cdot LAI \quad (2.31)$$

- $\dot{Q}_{led}$  è l'ultimo contributo relativo all'illuminazione artificiale. Il termine è il calore dissipato dai LED, a causa della loro efficienza non unitaria:

$$\dot{Q}_{led} = \frac{(1 - \eta)}{\eta} \cdot PAR \cdot A_c \quad (2.32)$$

dove  $\eta$  è l'efficienza dei LED, assunta pari a 0,52 ([51]).

- $\dot{Q}_{vent}$  è un contributo relativo al ricambio d'aria all'interno dell'involucro

$$\dot{Q}_{vent} = \frac{N \cdot V_c \cdot \rho_a}{3600} \cdot \Delta h \quad (2.33)$$

dove  $N$  è il numero di ricambi d'aria all'ora [ $h^{-1}$ ],  $V_c$  è il volume condizionato [ $m^3$ ] e  $\Delta h$  è la variazione di entalpia [ $kJ/kgK$ ]. Il volume condizionato è dato dall'area di base di  $1358 m^2$  moltiplicata per l'altezza della struttura (6,5 m). Si presume che i 272 rack occupino una porzione di questo volume pari al 35% nella serra verticale tradizionale e al 40% nella AVF. Poiché il sistema di trattamento dell'aria è un sistema HVAC, il termine  $\dot{Q}_{vent}$  è incluso in

$$\dot{Q}_{HVAC} = \dot{m}_{as} \cdot (h_a - h_{im}) \quad (2.34)$$

dove  $\dot{m}_{as}$  è la portata d'aria trattata dal sistema [ $kg/s$ ],  $h_a$  è il contenuto entalpico delle condizioni termoigrometriche interne [ $kJ/kgK$ ] e  $h_{im}$  è il contenuto entalpico delle condizioni termoigrometriche in ingresso [ $kJ/kgK$ ].

- $\dot{Q}_{sens}$  è un contributo relativo al flusso sensibile che la foglia scambia con l'ambiente:

$$\dot{Q}_{sens} = LAI \cdot C_{p_a} \cdot A_c \cdot \frac{T_s - T_a}{r_a \cdot v_a} \quad (2.35)$$

Il bilancio di massa è dato da

$$\dot{m}_{as} \cdot (y_{im} - y_a) + \dot{m}_v = 0 \quad (2.36)$$

dove  $y_{im}$  è il contenuto igrometrico dell'aria all'ingresso del sistema [kg<sub>v</sub>/kg<sub>as</sub>],  $y_a$  è il contenuto igrometrico dell'aria alle condizioni di set point [kg<sub>v</sub>/kg<sub>as</sub>] e  $\dot{m}_v$  è la portata di vapore emessa dagli impianti [kg/s]. L'indice di area fogliare utilizzato è tratto da uno studio sperimentale riportato in letteratura [52]. Per ottenere una stima giornaliera, la curva  $LAI$  è stata quindi derivata come funzione dei giorni utilizzando il metodo dei minimi quadrati. La relazione ottenuta tra  $LAI$  e il giorno di coltivazione ( $D_C$ ) è la seguente:

$$LAI = \sum_{i=1}^5 a_i \sin(b_i \cdot D_C + c_i) \quad (2.37)$$

dove a, b e c sono i coefficienti  $LAI$  riportati nella tabella 2.3. Il valore RMSE è 0,02695. Questa curva viene quindi ritagliata per tenere conto solo dei giorni di crescita all'interno di AVF e VF, escludendo così la fase di germinazione che, come già detto, nel nostro scenario avviene in una camera climatica separata per entrambe le serre. Poiché l'algoritmo si basa su equazioni di equilibrio termodinamico ben note, non è stato necessario eseguire una validazione.

Tabella 2.3: Coefficienti del  $LAI$  con l'approssimazione a somma di seni.

| Coefficient | 1        | 2      | 3      | 4      | 5       |
|-------------|----------|--------|--------|--------|---------|
| a           | 16.7     | 0.3033 | 0.1701 | 0.0647 | 0.02787 |
| b           | 0.008718 | 0.2072 | 0.3492 | 0.5711 | 0.7886  |
| c           | 0.01462  | -1.633 | 3.71   | 2.436  | 2.23    |

L'algoritmo integrato in Matlab esegue una serie di operazioni (equazioni (2.19)–(2.38)) per definire le condizioni di input ottimali alla chiusura dei bilanci per ogni giorno del ciclo di crescita in condizioni di luce e buio.

$$\begin{cases} h_{im} = -\frac{\dot{Q}_{disp} + \dot{Q}_{lat} + \dot{Q}_{sens} + \dot{R}_{sens} + \dot{R}_{rif} + \dot{Q}_{led} + \dot{Q}_{vent}}{\dot{m}_{as}} + h_a \\ y_{im} = -\frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{as}} + y_a \\ m_{as} = \frac{V_c \cdot N}{3600 \cdot v_a} \end{cases} \quad (2.38)$$

Ogni giorno, l'algoritmo calcola tutti i carichi energetici e di massa, come mostrato nella Figura 2.8, quindi individua le condizioni di ingresso. Il diagramma di flusso rappresentato nella Figura 2.9 riassume la serie di operazioni eseguite dall'algoritmo.

Una volta definite le condizioni di ingresso, l'algoritmo calcola tutti i punti psicrometrici sul diagramma ASHRAE e quindi riporta tutti i carichi del sistema HVAC. Infine, una volta noto il carico dell'evaporatore, c'è una sezione che calcola l'apporto energetico fuori progetto del refrigeratore per ottenere il consumo energetico del compressore. Una volta che l'algoritmo ha calcolato i valori del flusso d'aria per ogni giorno del ciclo di crescita, sarà possibile determinare le condizioni di ingresso di entalpia e umidità assoluta che il sistema HVAC deve raggiungere con i suoi componenti. In questo lavoro, è stato scelto un numero di variazioni orarie di  $N = 50 \text{ h}^{-1}$  per garantire la chiusura dei bilanci di massa ed energia in ogni giorno di crescita e il controllo ottimale delle condizioni microclimatiche interne. L'ipotesi di una velocità di ventilazione costante di  $N = 50 \text{ h}^{-1}$  è coerente con i risultati degli studi basati sul CFD delle fabbriche vegetali [53] condotti da Gao et al., che dimostrano che velocità di ricambio dell'aria più elevate riducono la stratificazione della temperatura e le deviazioni di umidità, migliorando così l'uniformità del microclima sopra la chioma delle colture. Tuttavia, valori  $N$  eccessivamente elevati potrebbero non migliorare ulteriormente l'uniformità e aumenterebbero il consumo energetico. Questa velocità di ventilazione garantisce una temperatura e un'umidità costanti rispetto a determinati valori di riferimento. Inoltre, una ventilazione frequente riduce il rischio di malattie eliminando le spore e altri agenti patogeni presenti nell'aria.  $N$  è stato assunto costante e uguale al valore più alto trovato dall'algoritmo in condizioni di stato stazionario, anche perché i limiti tecnologici impediscono di avere un sistema a capacità variabile che modifichi il flusso d'aria di oltre il 10% dal valore nominale. Come riportato da Okochi et al. [54], ciò comporterebbe problemi di rumore, aumento delle perdite di pressione e variazioni della velocità di ingresso nella serra, causando potenzialmente problemi alle piante coltivate.

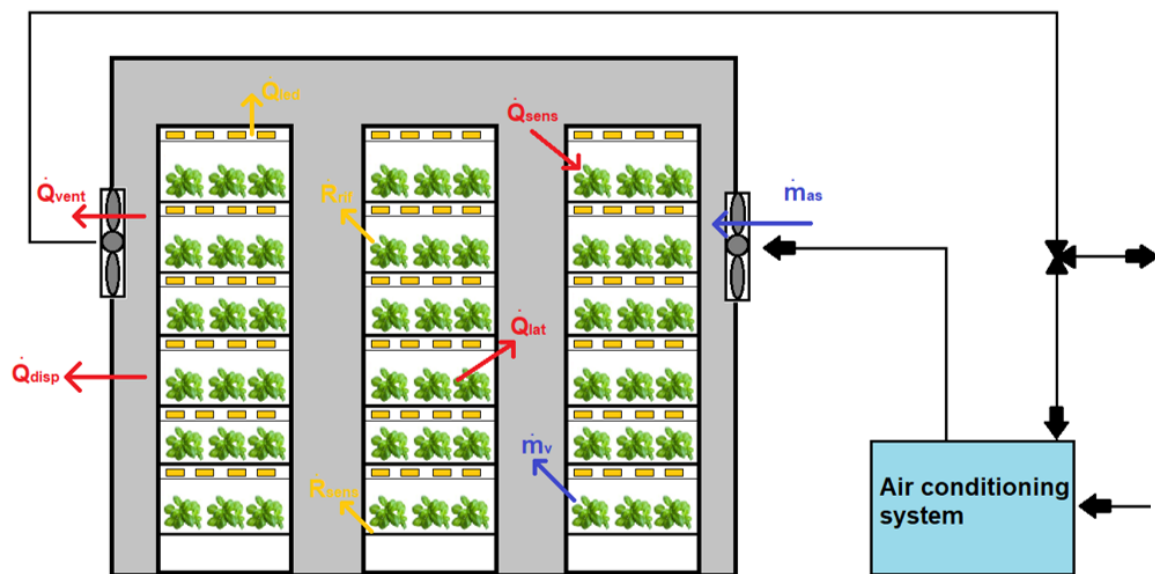


Figura 2.8: Scambio di massa ed energia nella serra.

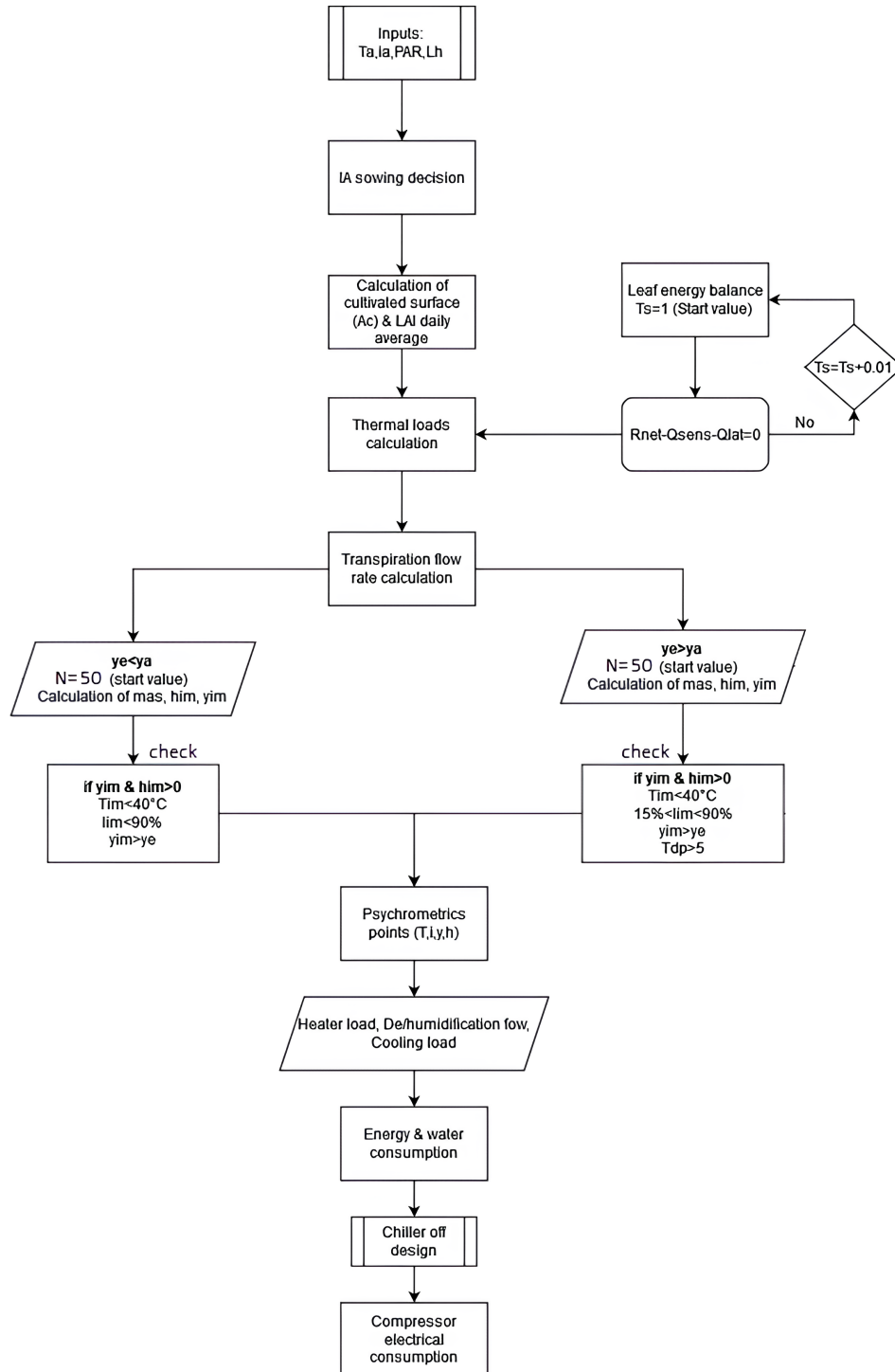


Figura 2.9: Operazioni svolte dall'algoritmo.

## 2.4 Carichi termici e igrometrici

In [23, 24, 25], è stato proposto un approccio di programmazione della semina che richiede la soluzione di un problema di programmazione lineare mista intera per sfruttare appieno tutto lo spazio verticale disponibile e massimizzare la resa. La programmazione AVF è riportata nella Tabella 2.4. L'algoritmo determina i giorni in cui deve avvenire il trapianto e calcola i parametri fondamentali come  $LAI$  e l'area coltivata per ogni giorno. Per calcolare in modo ottimale i giorni di semina nei diversi compartimenti, è necessario conoscere il modello di crescita delle piante. Curve di crescita accurate migliorano la sensibilità dell'algoritmo, portando a risultati più precisi. La curva di crescita rappresentata nella Figura 2.10 è stata utilizzata per la lattuga [55]. Una volta nota l'andamento dell'altezza delle piante, è necessario stabilire altri parametri per il calcolo. Per fornire una comprensione più chiara del funzionamento dell'agricoltura verticale adattiva (AVF), è stata analizzata la variazione giornaliera della posizione di ciascun ripiano. La figura 2.11 riporta l'evoluzione dell'altezza dei ripiani durante il ciclo di coltivazione, evidenziando come il sistema regoli dinamicamente la distanza tra i ripiani per adattarsi alla crescita delle piante. Questo meccanismo adattivo consente di massimizzare il numero di ripiani all'interno della stessa altezza del rack, migliorando così l'efficienza dell'uso del suolo rispetto ai sistemi di agricoltura verticale a ripiani fissi.

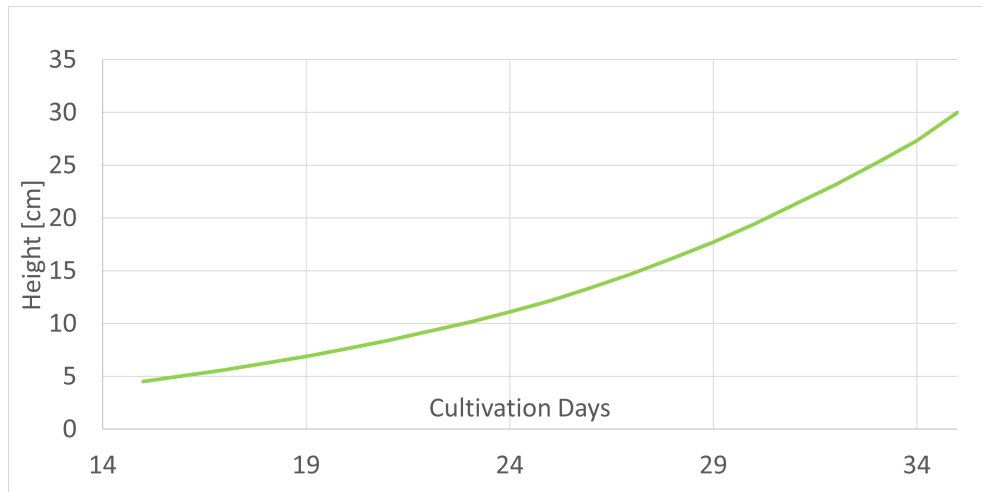


Figura 2.10: Variazione dell'altezza della lattuga in base al tempo di coltivazione, esclusa la fase di germinazione.

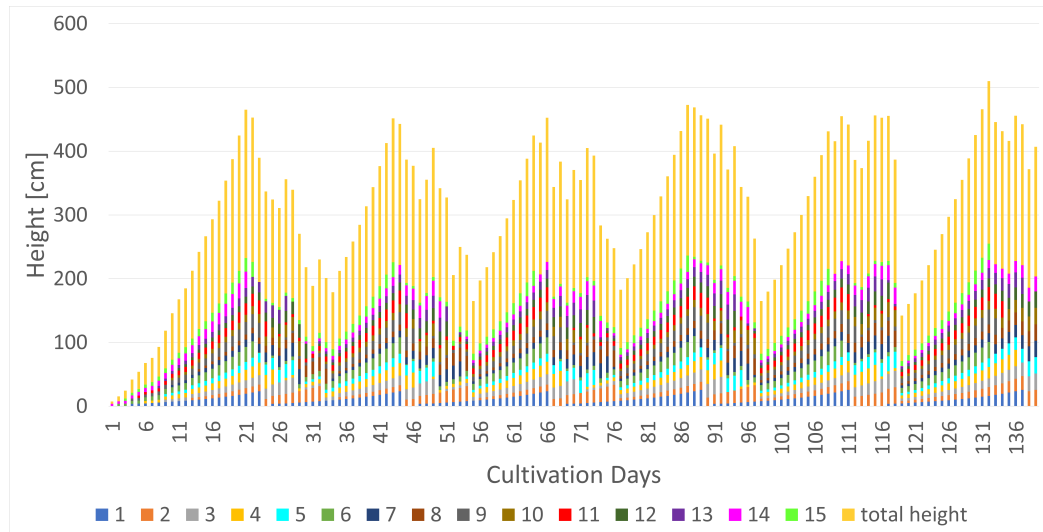


Figura 2.11: Evoluzione dell'altezza variabile su ciascun ripiano della scaffalatura durante il periodo di coltivazione.

Tabella 2.4: Giorni di trapianto in serra per ripiano in ciascun ciclo di coltivazione.

| Ripiani | Cicli di coltivazione |    |    |    |    |     |
|---------|-----------------------|----|----|----|----|-----|
|         | 1                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6   |
| 1       | 4                     | 25 | 47 | 69 | 91 | 117 |
| 2       | 13                    | 35 | 56 | 77 | 98 | 119 |
| 3       | 9                     | 30 | 51 | 72 | 98 | 119 |
| 4       | 6                     | 27 | 49 | 72 | 95 | 116 |
| 5       | 9                     | 30 | 54 | 75 | 98 | 119 |
| 6       | 2                     | 23 | 44 | 65 | 89 | 110 |
| 7       | 10                    | 34 | 55 | 76 | 97 | 119 |
| 8       | 14                    | 35 | 56 | 77 | 98 | 119 |
| 9       | 4                     | 27 | 49 | 70 | 92 | 113 |
| 10      | 10                    | 32 | 53 | 77 | 98 | 119 |
| 11      | 5                     | 26 | 47 | 70 | 91 | 114 |
| 12      | 11                    | 32 | 53 | 74 | 97 | 119 |
| 13      | 8                     | 32 | 53 | 74 | 96 | 117 |
| 14      | 1                     | 30 | 54 | 76 | 97 | 118 |
| 15      | 3                     | 24 | 45 | 67 | 88 | 112 |

A partire dai giorni di trapianto nella serra, il codice calcola l'area coltivata e quindi l'indice medio di area fogliare per ogni scaffale nella serra. Poiché la serra è considerata vuota all'inizio della simulazione (vedi Figura 2.12), c'è una "fase transitoria di avvio", corrispondente al primo ciclo di coltivazione in cui l'area coltivabile non è

ancora massimizzata. Seguono i cicli di coltivazione successivi, definiti come “stato stazionario”.

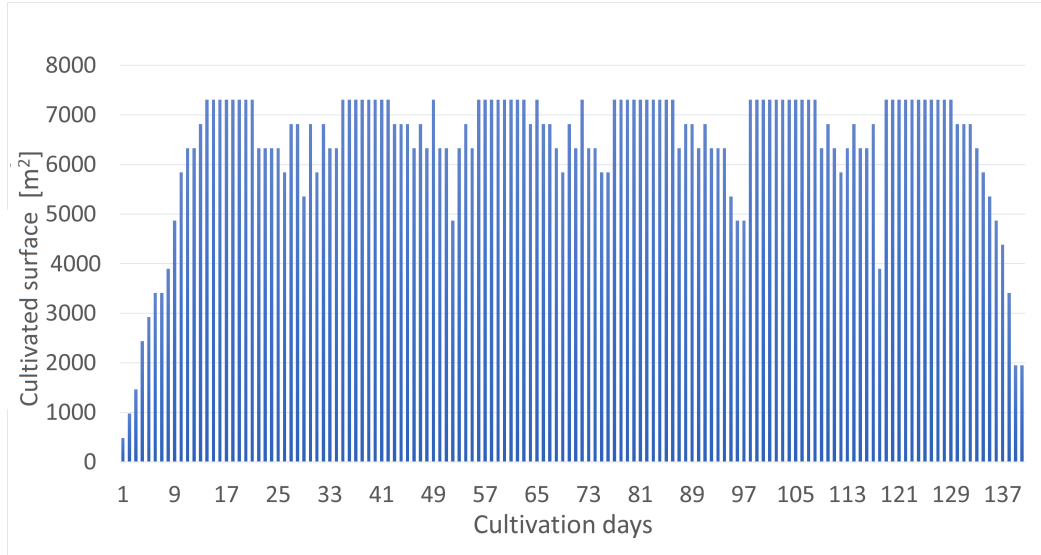


Figura 2.12: Variazione dell’area coltivata nel sistema AVF durante il periodo di coltivazione.

Il  $LAI$  è uno dei parametri fondamentali che influenzano il consumo energetico di una serra, quindi più è accurato, migliore sarà la stima di tutti i contributi termici e idrici relativi alle piante. In media, quindi, a causa della semina non coincidente, il  $LAI$  tende ad essere più basso nella serra adattiva poiché, nello stesso giorno, potrebbero esserci piante che si trovano al giorno 21 del ciclo e piante che si trovano nei primi giorni.

Nella fase finale, invece, le piante raggiungeranno tutte il  $LAI$  massimo poiché non verranno aggiunte nuove colture e, quindi, il  $LAI$  verrà calcolato sulle ultime piante più rigogliose. Un altro parametro chiave risultante dalla prima fase di calcolo dell’algoritmo è la produzione di vapore delle piante ( $LAI$  nella serra verticale adattiva è mostrato nella Figura 2.13). Una volta stimati questi parametri, è possibile eseguire il calcolo dei carichi termici. In particolare, per i flussi di calore scambiati con le piante, è necessario un ciclo di calcolo iterativo per trovare la temperatura della superficie fogliare ( $T_s$ ). In tale ciclo, la temperatura fogliare viene aggiornata fino a quando il bilancio energetico a livello della foglia presenta un errore di  $10^{-3}$ .



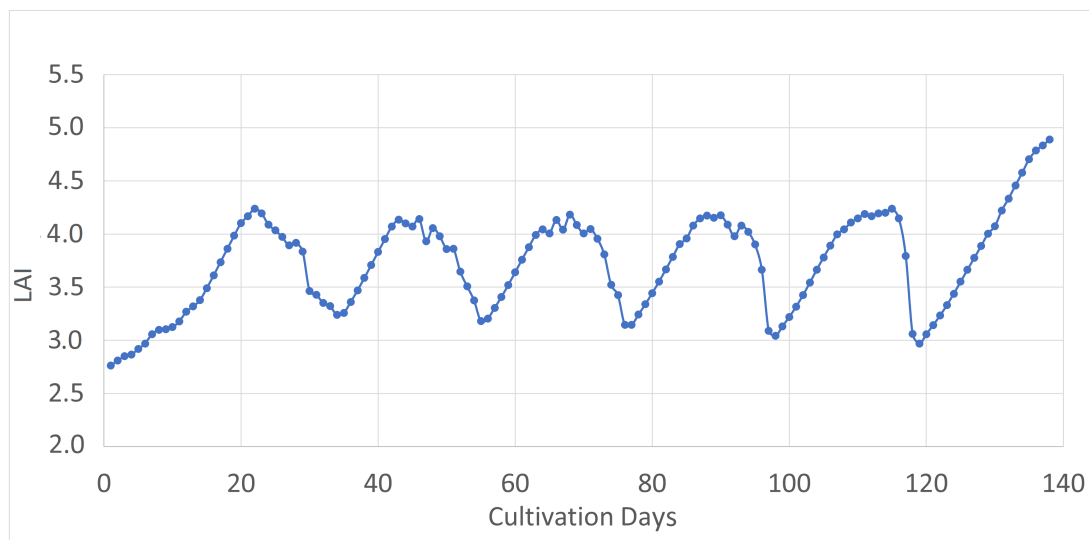


Figura 2.13: Variazione temporale della media giornaliera dell'indice di assorbimento della luce ( $LAI$ ) della lattuga durante il periodo di coltivazione.

La figura 2.14 mostra un esempio di carichi termici. È evidente come una superficie coltivata più ampia comporti un aumento considerevole dei carichi termici. Come mostrato nella figura 2.14, il carico che ha il maggiore impatto è quello latente. Il flusso sensibile scambiato tra le superfici fogliari e l'ambiente aumenta notevolmente, così come quello latente. L'aumento della superficie coltivata comporta la necessità di operare con carichi termici notevolmente più elevati. Entrambi questi parametri presentano un'estrema variabilità temporale. Ciò è dovuto al fatto che dipendono da diverse variabili che variano nel tempo, come l'indice di area fogliare, la superficie coltivata e la temperatura fogliare.

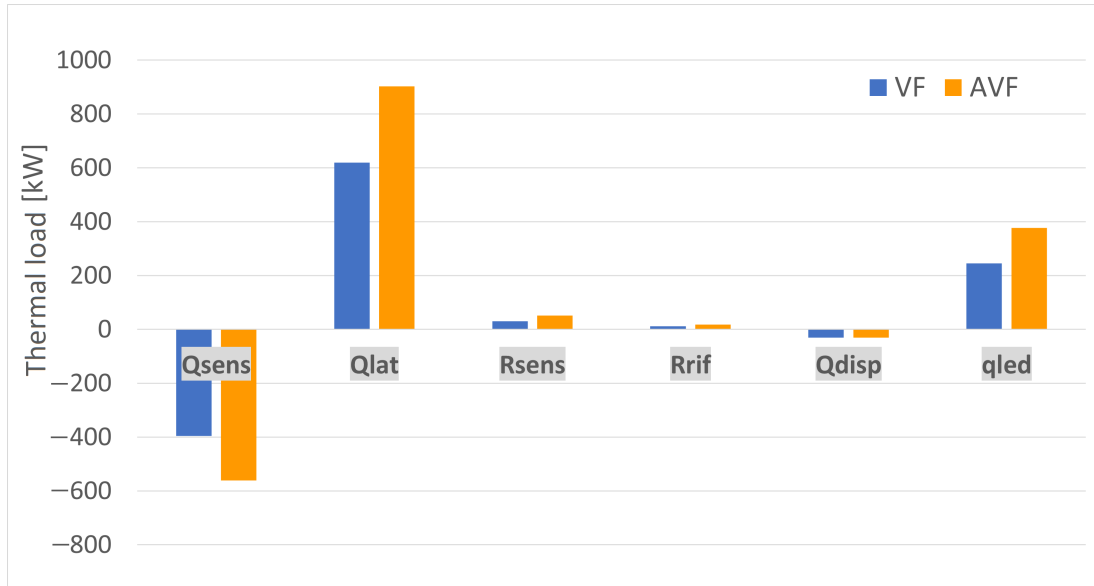
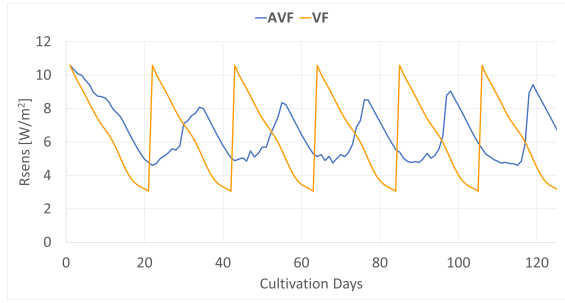
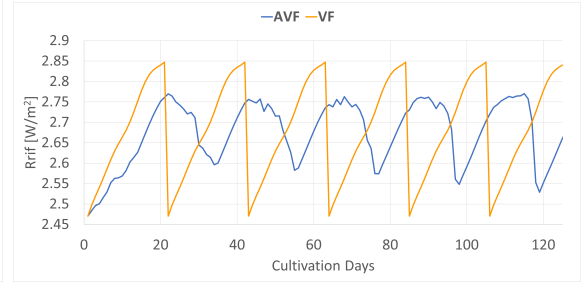


Figura 2.14: Termico carichi nei sistemi VF e AVF al 32° giorno di coltivazione.

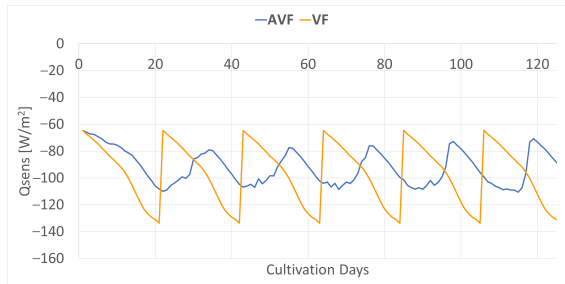
Un'analisi qualitativa della Figura 2.15 rivela che l'integrale di questi carichi specifici nel tempo è significativamente inferiore nel sistema adattivo (AVF) rispetto al VF convenzionale. Ciò implica che la serra adattiva funziona con carichi termici cumulativi inferiori durante tutto il ciclo di coltivazione. Questa differenza risiede nel fatto che sia i carichi sensibili che quelli latenti sono proporzionali alla superficie coltivata e all'indice di area fogliare. Come spiegato all'inizio del paragrafo, la serra adattiva ha un  $LAI$  medio giornaliero leggermente inferiore rispetto alla serra tradizionale, il che si traduce in carichi specifici inferiori rispetto al VF.



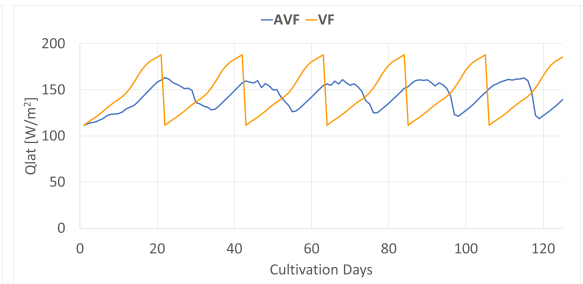
(a) Carico termico specifico derivante dalla radiazione sul suolo



(b) Carico termico specifico derivante dalla radiazione riflessa dalle foglie



(c) Confronto del carico sensibile specifico



(d) Confronto del carico latente specifico

Figura 2.15: Confronto di carichi termici specifici in VF e AVF: (a) Carico termico specifico della radiazione LED sul suolo. (b) Carico derivante dalla radiazione riflessa dalle foglie. (c) Confronto dei carichi sensibili. (d) Confronto dei carichi latenti.

Soprattutto in determinati giorni, come osservato nella Figura 2.16, il  $LAI$  dell'AVF ha valori inferiori a quelli del VF. Se consideriamo il caso coevo, nel VF l'area coltivata è costante e sempre uguale al valore massimo di  $4439 \text{ m}^2$  (ad eccezione dei giorni in cui vengono trapiantate nuove piantine). Come mostrato nella Figura 2.15, ogni 21 giorni si registra un picco nei carichi termici. Nei giorni di rinnovo delle piantine, si può notare che l'AVF presenta carichi specifici più elevati. Ciò evidenzia come il  $LAI$  svolga un ruolo chiave nel consumo energetico. Nei giorni in cui vengono trapiantate le nuove piante, infatti, VF ha un  $LAI$  inferiore, perché le piante hanno ancora foglie piccole. Nella serra adattiva, invece, poiché le semine non sono coeve, le foglie sono in media più grandi, il che implica un aumento dei carichi termici.

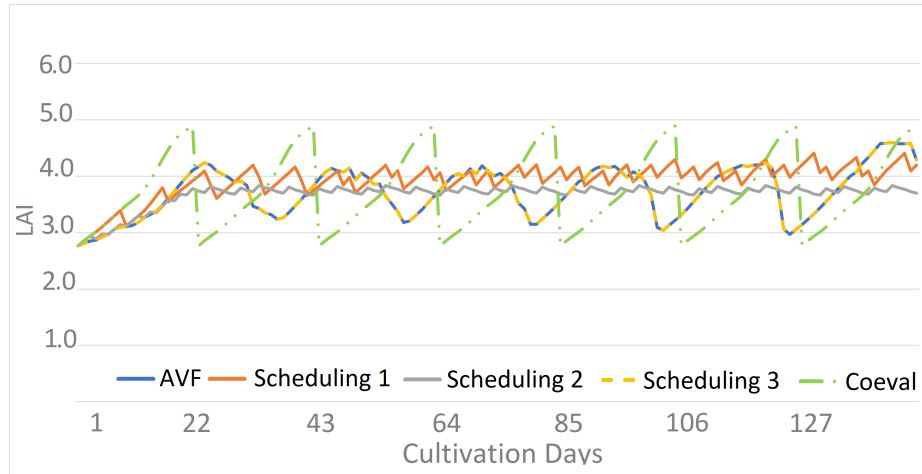
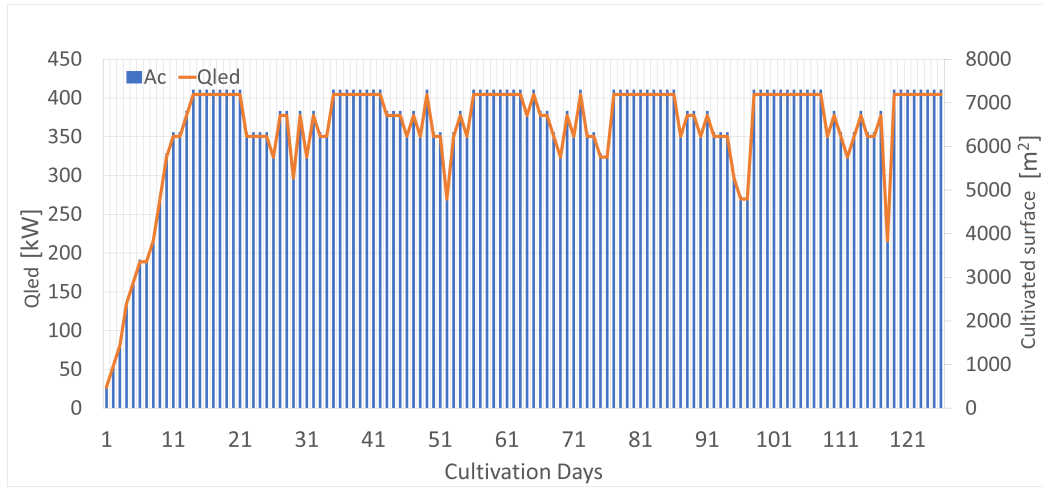
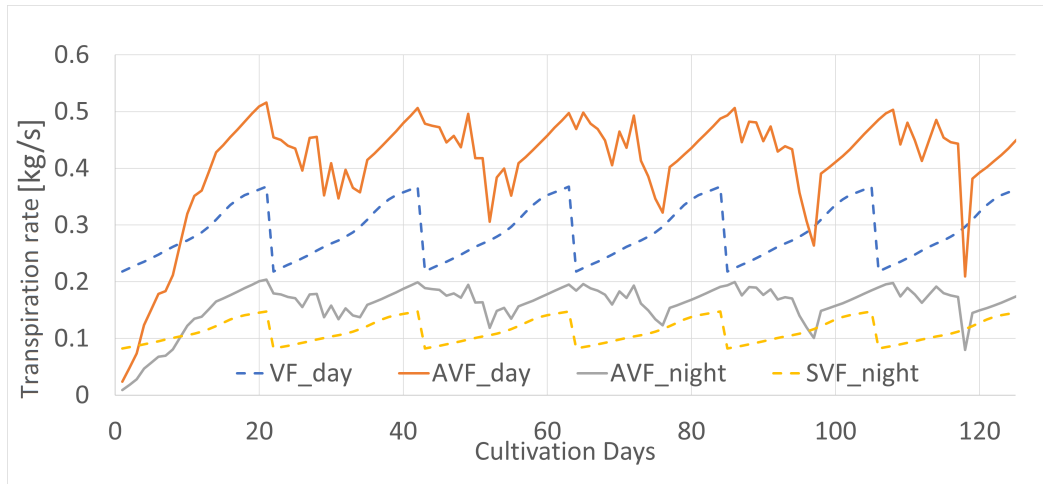


Figura 2.16: Media giornaliera dell'indice di area fogliare con diverse soluzioni di programmazione durante il periodo di coltivazione.

Il flusso di calore dell'irraggiamento che colpisce il suolo  $R_{sens}$  dovuto ai LED tende a diminuire durante ogni ciclo di coltivazione (come mostrato nella Figura 2.15), a causa dell'aumento della superficie fogliare. Nella serra adattiva si registrano maggiori fluttuazioni, sempre a causa della semina non coincidente che modifica continuamente la superficie irradiata. Nei primi giorni della fase transitoria di avvio, l'AVF mostra valori più elevati rispetto al VF. Questa differenza è legata al fatto che l' $LAI$  medio giornaliero è inferiore nel sistema AVF, il che porta a una riduzione della copertura dell'area coltivata e, quindi, a una superficie fogliare proiettata sul terreno più piccola. Successivamente, ci sono fasi in cui la serra adattiva ha un carico prevalente e fasi in cui prevale il carico del VF. In generale, il VF ha sempre un carico maggiore durante i primi giorni di coltivazione nei cicli di stato stazionario a causa della minore superficie fogliare presente durante il trapianto. Il contributo dovuto alla radiazione termica riflessa dalle foglie  $R_{rif}$ , d'altra parte, dovrebbe aumentare nel tempo (Figura 2.15), il che è correlato alla continua crescita della superficie fogliare. Poiché questo parametro è proporzionale all'area coltivata e all'area fogliare, è più elevato per il VF (durante la fase di avvio) a causa del  $LAI$  medio più elevato. Durante i cicli di stato stazionario, tuttavia, prevale il carico del sistema con l'area fogliare più ampia. Il flusso di calore dissipato dai LED è direttamente proporzionale all'area coltivata (Figura 2.17). È quindi logico aspettarsi un andamento costante del flusso di calore dissipato dai LED per il VF nel caso coevo. È tuttavia più interessante osservare l'andamento del flusso dissipato dai LED della serra adattiva, che segue l'andamento dell'area coltivata.



(a)



(b)

Figura 2.17: Confronto tra flusso termico dei LED e portata del vapore nel sistema AVF. (a) Calore Flusso dissipato dai LED nell'AVF e nell'area coltivata. (b) Portata del vapore traspirato in condizioni di illuminazione e oscurità.

Una volta calcolati i carichi termici, è possibile stimare il tasso di traspirazione emesso dalle piante. Tutti questi parametri sono strettamente correlati e hanno un impatto sul calcolo della portata del vapore. Come previsto, la serra adattiva produce una traspirazione maggiore rispetto a quella convenzionale. Le forti fluttuazioni osservate nella Figura 2.17 sono correlate alle fasi di semina e raccolta che modificano sia la superficie coltivata che il  $LAI$  medio giornaliero. Durante la notte, quando non c'è luce solare, le piante interrompono la fotosintesi e i loro stomi si chiudono. Di conseguenza, la traspirazione diminuisce in modo significativo o si interrompe del tutto. Ciò si verifica perché le piante non hanno bisogno di assorbire anidride carbonica e non c'è energia luminosa disponibile per svolgere il processo fotosintetico.

Di conseguenza, le piante riducono la traspirazione durante la notte. Il presente lavoro si limita a un unico approccio di stima dell'ET (Penman-Monteith) adattato ai sistemi a ambiente controllato. Tuttavia, recenti progressi hanno dimostrato che l'integrazione di dati multimodali con modelli più complessi, come il TSEB calibrato con UAV per le risaie [56], può migliorare significativamente l'accuratezza della stima del flusso energetico e dell'ET. L'estensione di tali approcci agli scenari di agricoltura verticale potrebbe affinare ulteriormente la previsione del fabbisogno idrico delle colture e degli scambi energetici.

## 2.5 Risultati delle simulazioni Termoenergetiche

L'analisi presentata è valida specificatamente per le coltivazioni di lattuga, ma può essere facilmente estesa ad altri tipi di colture, purché siano disponibili dati sperimentali adeguati relativi al  $LAI$  e alla relazione tra il tasso di crescita e le condizioni. Inoltre, è possibile analizzare altre strategie di programmazione, come mostrato di seguito. I risultati riportati considerano condizioni climatiche esterne di 30 °C e 80% di umidità relativa. Nelle simulazioni effettuate, è stata utilizzata una configurazione identica delle piante per entrambi i casi studiati (VF e AVF), dimensionata naturalmente in base ai carichi termoigrometrici di ciascuna serra.

L'analisi è stata effettuata in condizioni termoigrometriche stazionarie (sia interne che esterne). La semina è stata gestita utilizzando l'algoritmo di ottimizzazione descritto in [23, 25], che ricerca il giorno migliore per trapiantare le piantine durante il ciclo di crescita. La fase di germinazione è stata gestita separatamente in una camera climatica dedicata e dura 14 giorni.

### 2.5.1 Analisi di variazione dello Scheduling VF

Le simulazioni condotte per VF hanno coinvolto diverse strategie di semina non coeve e una con modalità di semina coevale:

- Trapianto coevo: tutti i trapianti avvengono in un solo giorno.
- Scheduling 1: il trapianto avviene in modo tale che il VF venga riempito per 1/3 ogni settimana.
- Scheduling 2: l'algoritmo utilizzato per decidere i giorni di trapianto è lo stesso utilizzato in AVF, ma con solo 8 ripiani.

- Scheduling 3: l'algoritmo utilizzato per decidere i giorni di trapianto è lo stesso utilizzato in AVF; in questo caso, i ripiani sono divisi in 15 gruppi: 13 gruppi di 18 ripiani e 2 gruppi di 19 ripiani. In questo caso, l'algoritmo decide per gruppo e non per scaffali.

La strategia della semina non coeva, in AVF, consente un aumento del numero di ripiani e quindi una maggiore superficie coltivabile con lo stesso numero di scaffali. Poiché la serra adattiva necessita di un certo periodo per raggiungere la piena capacità, vale la pena osservare cosa succede una volta trascorso questo periodo. Già dopo un primo ciclo di coltivazione, si può notare che l'area coltivata è quasi massimizzata. L'andamento del  $LAI$ , mostrato nella Figura 2.18, utilizzato per la serra verticale tradizionale è quello della lattuga baby leaf proveniente da uno studio sperimentale riportato in letteratura [52]. Per la VF, il  $LAI$  non oscilla tanto quanto nella serra adattiva. Poiché la semina nella serra adattiva viene effettuata in giorni diversi, ci sarà un  $LAI$  diverso in ogni scomparto degli scaffali. Come menzionato sopra, era opportuno fare una stima del  $LAI$  medio giornaliero, mostrato nella Figura 2.16, che è rappresentativo della situazione che si verifica in media in ogni scaffale. Il  $LAI$  è uno dei parametri fondamentali che influenzano il consumo energetico di una serra, quindi più è accurato, migliore sarà la stima di tutti i contributi termici e idrici relativi alle piante. In media, quindi, a causa della semina non coerente, il  $LAI$  tende ad essere più basso nella serra adattiva poiché, nello stesso giorno, possono esserci piante che sono al giorno 21 del ciclo e piante che saranno nei primi giorni. L'andamento del  $LAI$  medio giornaliero per tutte le diverse programmazioni e per la semina coeva è mostrato nella Figura 2.16. Come si può vedere, il  $LAI$  più svantaggioso è presente nel caso della semina coeva, cioè quando il trapianto delle specie avviene simultaneamente in tutti i rack. In questo modo, la situazione è certamente più omogenea, ma questo approccio è anche meno realistico in quanto richiederebbe un alto grado di automazione del sistema. Il  $LAI$  del sistema AVF segue un andamento che oscilla notevolmente, come accennato in precedenza, a causa della variabilità del periodo di trapianto in ogni singolo rack. Per questo motivo, ci sono giorni in cui il  $LAI$  del VF ha valori più elevati rispetto a quelli della serra adattiva, portando così a un consumo maggiore. Tuttavia, la prima programmazione è svantaggiosa rispetto alla seconda perché porta comunque a una maggiore omogeneità delle semine, avendo più specie presenti nella fase avanzata del ciclo di crescita. La seconda programmazione che segue l'algoritmo decisionale AVF garantisce comunque una maggiore variabilità tra i diversi livelli di  $LAI$ . Pertanto, nel complesso, avremo un  $LAI$  inferiore rispetto alla programmazione 1. La programmazione 3 è condotta in modo tale da annullare la differenza esistente

tra il  $LAI$  adattivo e quello tradizionale; infatti, i due valori saranno gli stessi per tutti i giorni di crescita, come si può vedere nella figura.

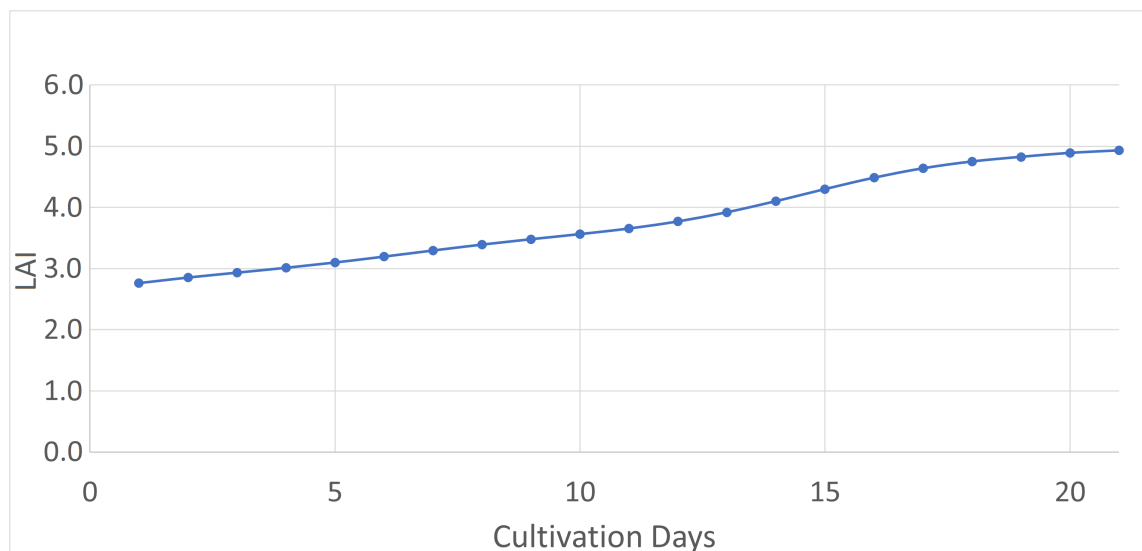


Figura 2.18: Leaf area index della lattuga (escluso il periodo di germinazione) su un ciclo di coltivazione.

## 2.6 Consumo energetico per il condizionamento climatico

Tutti i consumi sono calcolati dopo il primo ciclo di coltivazione, per garantire che il sistema AVF sia conforme al regime. La prima cosa che si osserva è l'estrema variabilità del consumo di riscaldamento. Ciò è indubbiamente legato alla variazione dei carichi termici durante le fasi di trapianto, semina e raccolta delle piante. In particolare, ogni 21 giorni circa, si osserva un valore minimo di consumo, senza dubbio determinato dal minor fabbisogno energetico del sistema dovuto alla minore presenza di piante. Allo stesso modo, prima dei 21 giorni (e quindi prima del raccolto), si può individuare un valore massimo di consumo. La figura 2.19 mostra la differenza che esiste tra AVF e VF in tutte le diverse configurazioni di programmazione. Anche in questo caso, vengono riportate le stesse considerazioni fatte per  $LAI$ ; il caso VF coevo sarà il più svantaggioso dal punto di vista energetico, a causa del gran numero di piante presenti contemporaneamente nell'ambiente. Il consumo energetico dei LED è direttamente proporzionale alla superficie coltivata. È logico, quindi, aspettarsi un andamento costante dei consumi per la serra convenzionale, che si aggira intorno agli 8000 kWh/giorno. In AVF, il consumo di illuminazione è variabile (Figura



2.19) a causa della variazione della superficie coltivata. Chiaramente, maggiore è il numero di compartimenti coltivati, maggiore sarà l'illuminazione artificiale da fornire al sistema. Lo stesso vale per tutte le diverse modalità di programmazione suggerite. Naturalmente, il limite massimo si ottiene quando la serra raggiunge la situazione di regime con la superficie coltivata massima. L'unità di controllo, esaminando i segnali inviati dai sensori situati in tutto il sistema, calcola la temperatura ottimale che il ciclo di refrigerazione deve garantire all'evaporatore. Questo parametro è essenziale per garantire un'adeguata deumidificazione dell'aria trattata. Il secondo componente del sistema HVAC è una serpentina calda che riscalda l'aria al livello di entalpia desiderato per le condizioni di ingresso. Anche il consumo di deumidificazione varia notevolmente durante i cicli di crescita (Figura 2.19). Queste variazioni sono essenzialmente dovute alla crescita delle piante che, aumentando la loro superficie fogliare ( $LAI$ ), tenderanno ad emettere un tasso di traspirazione maggiore. Naturalmente, un altro parametro che influenza questo consumo è la superficie coltivata. Essenzialmente, nella serra tradizionale, quest'ultimo parametro è considerato costante (nel caso coevo), quindi l'andamento del consumo è lo stesso del  $LAI$ ; nella serra adattiva, invece, il consumo è influenzato sia dalla superficie fogliare che dalla superficie coltivata (che varia di giorno in giorno a causa della semina non coincidente). Anche in questa situazione, i picchi presenti nel caso di semine coeve di VF superano tutti i casi storici di VF con programmazione diversa e, in alcuni casi, anche il consumo di AVF. Tutti i contributi al consumo energetico sono riportati nella Figura 2.20; come previsto, il consumo è maggiore nell'AVF, poiché vi è una superficie coltivata più estesa. Riassumendo quanto osservato, il consumo energetico è riportato nella Tabella 2.5. Inoltre, è importante portare tutti i contributi energetici allo stesso livello. In questo caso, per ottenere una visione più chiara del sistema energetico, vengono riportati i vari contributi in energia primaria (termica). Per questo motivo, i valori dell'energia consumata per il riscaldamento sono divisi per l'efficienza media di una caldaia (90%). I valori dell'energia elettrica, invece, saranno correlati al valore dell'efficienza di generazione nazionale (in Italia, ad esempio, è del 48% [57]).

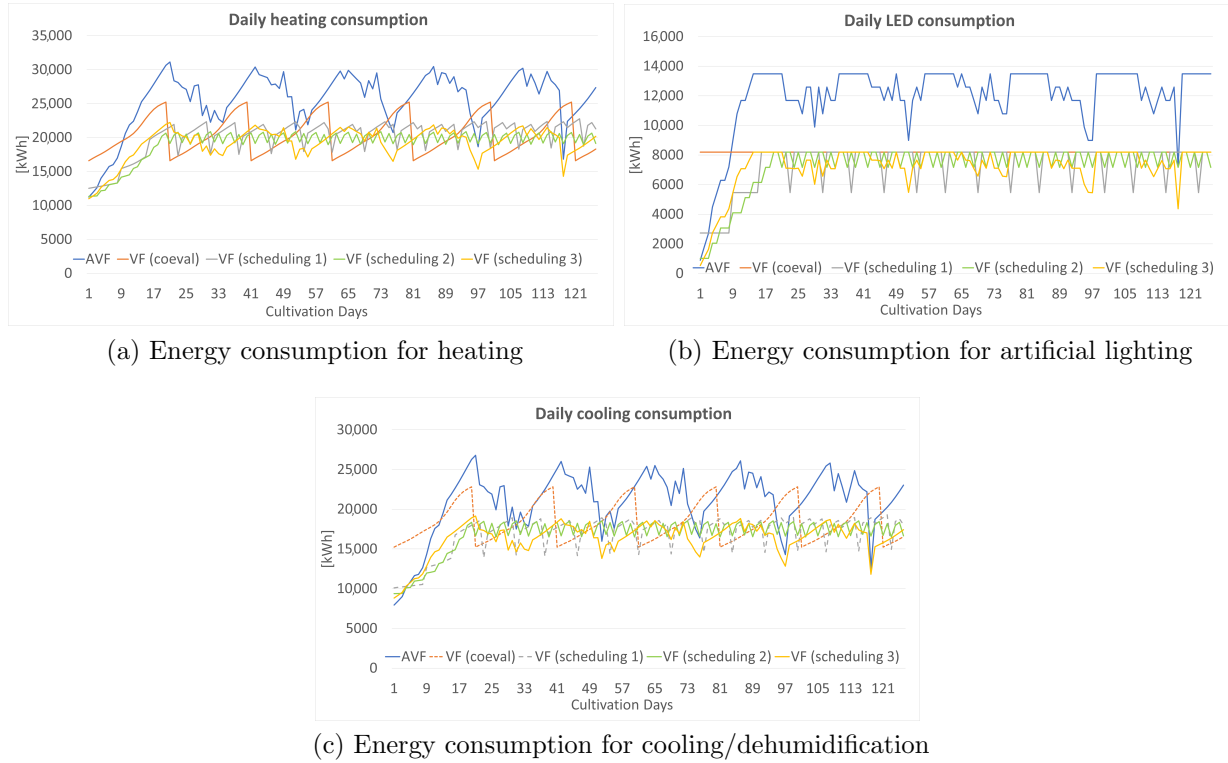


Figura 2.19: Confronto del consumo energetico nei sistemi AVF e VF in diversi scenari di programmazione: (a) Riscaldamento. (b) Illuminazione artificiale. (c) Raffreddamento e deumidificazione.

Tabella 2.5: Consumo energetico in 6 cicli di coltivazione in AVF e VF con diversi algoritmi di programmazione.

| Technology                                          | AVF    | VF<br>(Sche-<br>du-<br>ling<br>1) | VF<br>(Sche-<br>du-<br>ling<br>2) | VF<br>(Sche-<br>du-<br>ling<br>3) | VF<br>(Coe-<br>val) |
|-----------------------------------------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Heating [MWh]                                       | 3911   | 3220                              | 3075                              | 3070                              | 3252                |
| Heating: primary energy [MWh]                       | 4346   | 3578                              | 3417                              | 3411                              | 3613                |
| LED [MWh]                                           | 1507   | 931                               | 915                               | 916                               | 1032                |
| LED: primary energy [MWh]                           | 3140   | 1940                              | 1906                              | 1908                              | 2150                |
| Cooling [MWh]                                       | 3474   | 2980                              | 2968                              | 2885                              | 3200                |
| Cooling: primary energy [MWh]                       | 7238   | 6208                              | 6183                              | 6010                              | 6667                |
| Total energy [MWh]                                  | 8892   | 7131                              | 6958                              | 6871                              | 7484                |
| Total primary energy [MWh]                          | 14,723 | 11,726                            | 11,506                            | 11,330                            | 12,430              |
| Total specific primary energy [MWh/m <sup>2</sup> ] | 2.02   | 2.64                              | 2.59                              | 2.55                              | 2.80                |

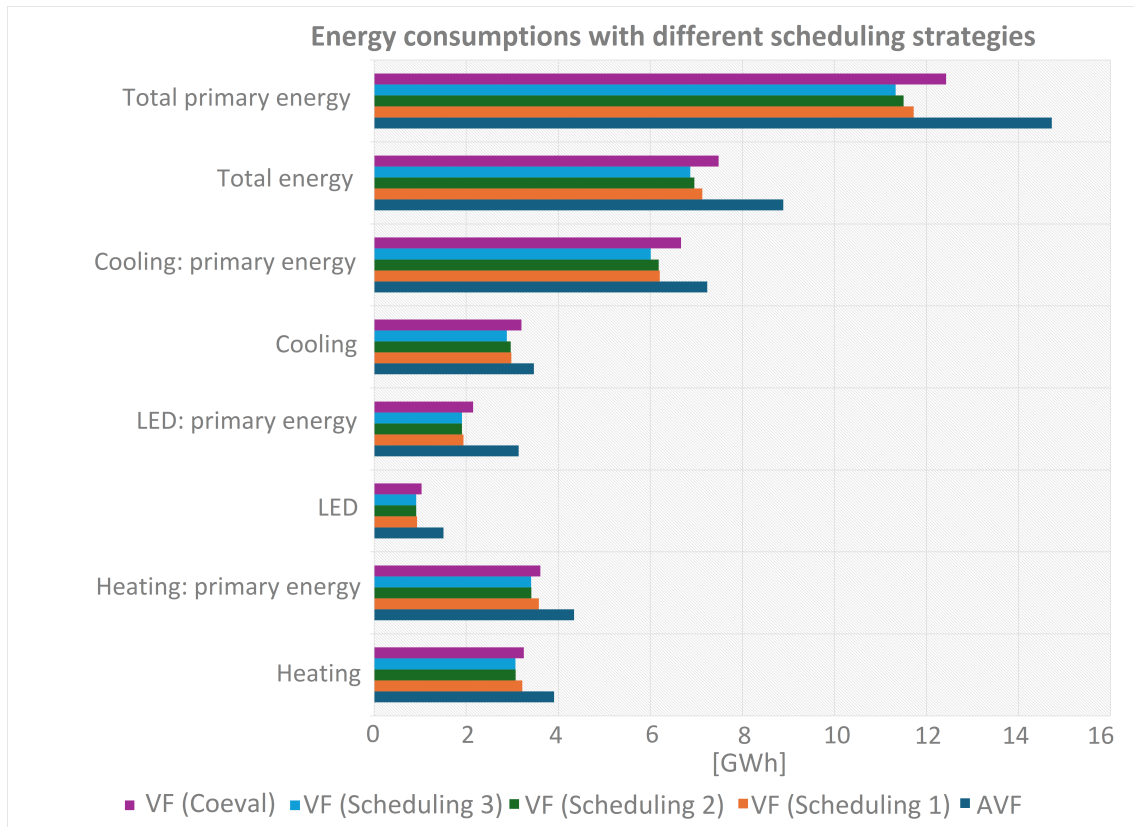


Figura 2.20: Consumi energetici in AVF e VF con diverse strategie di programmazione su 6 cicli di coltivazione.

Come si può vedere, il consumo della serra adattiva è maggiore per tutti e tre i componenti: riscaldamento, illuminazione e raffreddamento. Tuttavia, il raggiungimento della condizione di equilibrio porta la serra adattiva a coltivare un'area di 7303 m<sup>2</sup>, rispetto ai 4439 m<sup>2</sup> della serra convenzionale. Parametrizzando il consumo totale sulla rispettiva area coltivata, si ottiene il seguente consumo specifico:

- Scheduling 1: il risparmio energetico AVF è del 24%.
- Scheduling 2: il risparmio energetico AVF è del 22%.
- Scheduling 3: il risparmio energetico AVF è del 21%.
- Coeva: il risparmio energetico AVF è del 28%.

Il motivo alla base di questo risparmio energetico è principalmente legato al volume minore che deve essere climatizzato nella serra adattiva (grazie al maggior numero di ripiani nei rack) rispetto alla serra verticale standard. Inoltre, la programmazione dell'AVF combinata con il maggior numero di ripiani per rack consente un *LAI* medio

giornaliero che oscilla molto più di una serra con meno ripiani. Infatti, come si può vedere nella Figura 2.16, quando il  $LAI$  scende a valori inferiori rispetto alla VF, si ottiene una riduzione dei consumi per la serra adattiva. Inoltre, i risultati confermano quanto abbiamo visto finora, ovvero che nella strategia di semina coeva il consumo è il più elevato rispetto a tutti gli altri casi storici, proprio a causa della minore fluttuazione del  $LAI$ .

Inoltre, il confronto dei consumi è stato effettuato nelle stesse condizioni e senza approfondire la natura degli input energetici del sistema di climatizzazione. Per questo motivo, sarà interessante approfondire la questione introducendo un sistema di trattamento dell'aria con un'unità di riscaldamento a caldaia e sistemi di recupero del calore dal condensatore e dall'aria in uscita dalla serra, al fine di ridurre al minimo il consumo di energia per il riscaldamento. Nonostante i risultati promettenti del sistema AVF in termini di efficienza energetica e superficie coltivabile, è necessario riconoscere alcuni limiti del presente studio. Innanzitutto, è stata studiata una sola specie coltivabile (*Lactuca sativa*). Estendere l'analisi a più specie richiederebbe di fornire al modello curve di crescita specifiche per ciascuna specie (altezza della pianta nel tempo) e dinamiche dell'indice di area fogliare ( $LAI$ ). Purtroppo, tali dati sono ancora scarsi in letteratura e sarebbero necessarie ulteriori misurazioni sperimentali per ottenere input affidabili. In secondo luogo, l'integrazione dei sistemi AVF con le reti energetiche urbane non è stata ancora studiata. Data l'elevata domanda energetica dell'agricoltura verticale, la valutazione delle interazioni con la rete, delle potenziali strategie di risposta alla domanda e delle soluzioni di stoccaggio dell'energia sarà fondamentale per valutare la sostenibilità delle implementazioni AVF su larga scala. Affrontare queste limitazioni è essenziale per orientare la ricerca futura verso soluzioni di agricoltura verticale robuste, multispecie e integrate dal punto di vista energetico. Oltre all'ottimizzazione energetica, gli sviluppi futuri nell'agricoltura verticale potrebbero anche trarre vantaggio dall'integrazione di sistemi informativi basati sull'IoT e sull'intelligenza artificiale, che hanno già dato risultati promettenti nella previsione dei prezzi dei prodotti agricoli, come dimostrato da Luo et al. [58]. Nel contesto dell'agricoltura verticale, tali strumenti potrebbero consentire una gestione più precisa delle colture attraverso il monitoraggio in tempo reale della crescita e delle condizioni microclimatiche, una programmazione predittiva allineata alla domanda di mercato e un'integrazione intelligente con i sistemi energetici e logistici urbani. L'abbinamento di modelli di produzione avanzati con sistemi di previsione orientati al mercato può quindi fornire un approccio più olistico all'agricoltura urbana sostenibile.

## Capitolo 3

# Identificazione parametrica White-box dei coefficienti per la stima del $LAI$ nelle AVF

In questa parte dello studio è presente un approccio di identificazione parametrica white-box volto a determinare i coefficienti dell'indice di area fogliare ( $LAI$ ), un parametro cruciale per migliorare l'accuratezza dei modelli matematici che stimano il consumo energetico nelle serre verticali adattive. Poiché la tecnologia delle serre verticali è ancora in fase di ricerca e sviluppo, non è stato possibile acquisire dati sperimentali per l'analisi. Pertanto, i dati generati dal modello saranno utilizzati per lo studio di identificazione white-box. L'analisi proposta si basa su una metodologia trasparente che consente una stima precisa dell'andamento del  $LAI$  nei sistemi AVF, ottimizzando le simulazioni energetiche. L'approccio descritto fornisce uno strumento importante per perfezionare la progettazione e la gestione energetica delle serre verticali, contribuendo a una gestione più efficiente delle risorse e a un consumo energetico ridotto. Il modello utilizzato nel lavoro di identificazione è composto da due parti: il modello di crescita delle piante (Penman-Monteith) e il modello per la gestione termoigrometrica del sistema di coltivazione AVF.

### 3.1 Introduzione all'identificazione White-Box

L'identificazione parametrica white-box è un approccio di modellizzazione in cui la struttura del modello è definita a priori sulla base di conoscenze teoriche del sistema, e l'obiettivo è stimare i valori dei parametri che meglio rappresentano il comportamento osservato. In questo contesto, "white-box" indica che il modello

è trasparente e interpretabile, a differenza dei modelli black-box che si limitano a catturare correlazioni empiriche senza riferimenti fisici o biologici sottostanti.

Formalmente, consideriamo un modello matematico del tipo:

$$y(t) = f(t, \theta) \quad (3.1)$$

dove  $y(t)$  rappresenta la variabile osservata (ad esempio il Leaf Area Index in funzione del tempo),  $f()$  è una funzione nota derivante da principi biologici o fisiologici, e  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$  è il vettore dei parametri incogniti da stimare. L'identificazione parametrica consiste nel trovare il vettore  $\theta$  che minimizza una funzione di errore tra dati osservati e predetti, ad esempio attraverso un approccio di tipo least-squares:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N (y_{\text{osservato}}(t_i) - f(t_i, \theta))^2. \quad (3.2)$$

Nel caso del *LAI*, la funzione  $f(t, \theta)$  può assumere forme che rappresentano i processi di germinazione, espansione fogliare e senescenza, come equazioni di crescita esponenziale o sigmoide, con parametri che controllano velocità di crescita, massimo teorico del *LAI* e tempi caratteristici di sviluppo. La stima dei parametri tramite dati sperimentali permette non solo di adattare il modello ai valori osservati, ma anche di ottenere parametri interpretabili biologicamente, utili per simulazioni predittive, analisi di scenario o confronto tra genotipi o condizioni ambientali.

L'utilizzo di questa tecnica di identificazione in questo contesto è molto utile per andare a scoprire parametri che in letteratura scarseggiano e che possono essere molto utili per proseguire studi di questo genere. In particolare, nel contesto agronomico, non è comune fare misurazioni del *LAI* visto che solitamente per la resa produttiva si fa riferimento al peso delle foglie. In questo caso, avvalendoci dell'identificazione parametrica White-Box e del modello agronomico e termodinamico della serra, è possibile scoprire i valori del *LAI* matematicamente. In studi futuri, avvalendosi di un prototipo del sistema che sia simile al modello descritto sarà possibile effettuare misurazioni sperimentali utili a validare questi studi e a risalire a valori del *LAI* di altre specie da coltivare al fine di rendere il modello più flessibile, testando anche tipologie di piante diverse dalla lattuga. L'algoritmo di ottimizzazione utilizzato per risolvere il problema è riportato nel paragrafo successivo 3.1.1.

### 3.1.1 Ottimizzatore `fmincon`

La funzione `fmincon` di MATLAB è uno strumento molto utilizzato per risolvere problemi di ottimizzazione non lineare vincolata, ovvero per determinare il valore di

un insieme di variabili che minimizza una certa funzione obiettivo soggetta a vincoli sia di tipo lineare che non lineare. In termini formali, il problema affrontato può essere espresso come:

$$\min_{\theta} J(\theta) \quad (3.3)$$

soggetto a:

$$\begin{cases} c(\theta) \leq 0 \\ c_{eq}(\theta) = 0 \\ A\theta \leq b \\ A_{eq}\theta = b_{eq} \\ \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (3.4)$$

dove  $J(\theta)$  è la funzione obiettivo scalare,  $\theta$  è il vettore delle variabili decisionali (nel presente contesto, i parametri del modello),  $c(\theta)$  e  $c_{eq}(\theta)$  rappresentano rispettivamente i vincoli non lineari di disuguaglianza e di uguaglianza, mentre  $A$ ,  $b$ ,  $A_{eq}$  e  $b_{eq}$  definiscono eventuali vincoli lineari. I termini  $\theta_{\min}$  e  $\theta_{\max}$  impongono limiti inferiori e superiori sui parametri.

Nel caso dell'identificazione parametrica, la funzione obiettivo  $J(\theta)$  è tipicamente definita come somma dei quadrati degli errori tra dati sperimentali e modello, ad esempio:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^N (y_{\exp}(t_i) - f(t_i, \theta))^2 \quad (3.5)$$

dove  $y_{\exp}(t_i)$  rappresenta il valore misurato e  $f(t_i, \theta)$  il valore previsto dal modello.

Internamente, **fmincon** utilizza algoritmi di ottimizzazione iterativi, quali metodi di tipo *interior-point*, *Sequential Quadratic Programming* (SQP) o *trust-region*, che determinano direzioni di discesa compatibili con i vincoli imposti. Tali metodi sfruttano informazioni di gradiente e, quando disponibili, di curvatura della funzione obiettivo e dei vincoli, aggiornando iterativamente la soluzione fino al soddisfacimento di criteri di convergenza predefiniti.

Uno dei principali vantaggi di **fmincon** è la sua elevata flessibilità: consente di gestire simultaneamente vincoli di diversa natura e di integrare informazioni fisiche o biologiche direttamente nel processo di ottimizzazione. Ciò risulta particolarmente rilevante nei problemi di modellistica e identificazione parametrica, in cui non è sufficiente minimizzare l'errore rispetto ai dati sperimentali, ma è necessario garantire

che i parametri stimati rimangano coerenti con i vincoli teorici e le condizioni di plausibilità fisica del sistema analizzato.

### 3.2 Approssimazioni del $LAI$ e modello White-Box per l'identificazione

Il modello di calcolo descritto nel capitolo 2.3 viene utilizzato per generare dati che, in questo studio, sono utilizzati al posto dei dati sperimentali. È possibile ipotizzare una curva che descriva l'andamento del  $LAI$  durante un ciclo di coltivazione. In un sistema AVF industriale, il ciclo di coltivazione prevede diverse fasi. In particolare, ci sarà una fase di avviamento transitoria in cui il sistema è inizialmente vuoto e viene riempito secondo l'algoritmo di programmazione. Dopo il primo ciclo di coltivazione, il sistema raggiungerà lo stato stazionario e i rack funzioneranno alla massima resa. Utilizzando la lattuga baby leaf come specie coltivata, si ipotizza un ciclo di coltivazione di 21 giorni (esclusa la fase di germinazione, che viene gestita separatamente nelle serre verticali). I valori di output del modello da utilizzare al posto dei dati sperimentali devono essere parametri facilmente misurabili in un sistema di questo tipo, quali: il flusso d'aria elaborato dal sistema HVAC (2.2), la temperatura e l'umidità relativa dell'aria che entra nel sistema. L'obiettivo dell'algoritmo è quello di minimizzare l'errore, ovvero la differenza tra i valori sperimentali e quelli ottenuti dal modello, ipotizzando una determinata tendenza del  $LAI$ . Le curve scelte per descrivere la tendenza del  $LAI$  sono le seguenti:

- Somma di polinomi:

$$LAI(\tau) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \tau^{n-i} \quad (3.6)$$

- Somma di seni:

$$LAI(\tau) = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \sin(\theta_i \cdot \tau + \phi_i) \quad (3.7)$$

- Somma di tangenti iperboliche:

$$LAI(\tau) = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \tanh(\theta_i \cdot \tau + \phi_i) \quad (3.8)$$

- Somma di funzioni in base radiale:

$$LAI(\tau) = \sum_{i=1}^n e^{\frac{-||\tau - \gamma_i||^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3.9)$$



Ciò che cerchiamo con il seguente studio sono i coefficienti delle curve sopra menzionate. Questi sono espressi nel vettore  $\underline{X}$  per l'approssimazione polinomiale:

$$\underline{X} := [c_1 \ c_2 \ .. \ c_n] \in \mathbb{R}^n \quad (3.10)$$

Il modello prende come input la curva scelta e il numero di coefficienti  $\underline{X}$  e, utilizzando un algoritmo di ottimizzazione, cerca i coefficienti che minimizzano la funzione di errore. Quest'ultima è definita come segue:

$$\epsilon(\tau) = \sum_{j=1}^n |\dot{m}_j(\tau) - \dot{m}_{j,\text{exp}}(\tau)| + |T_j(\tau) - T_{j,\text{exp}}(\tau)| + |i_j(\tau) - i_{j,\text{exp}}(\tau)| \quad (3.11)$$

È descritto come un errore assoluto tra i risultati del modello e i valori sperimentali (portata d'aria, temperatura di ingresso e umidità relativa dell'aria in ingresso). Esprimiamo la somma dei risultati del modello utilizzando la notazione  $\underline{Y}(\tau, \underline{X})$  e la somma dei parametri misurati sperimentalmente come  $\underline{Y}^{\text{exp}}(\tau)$ . Pertanto, la funzione di costo sarà la norma del vettore risultante:

$$\mathcal{J}(\underline{X}) := \frac{1}{\mathcal{T}} \sum_{j=1}^n \left\| \underline{Y}^{(i)}(\tau, \underline{X}) - \underline{Y}^{(i),\text{exp}}(\tau) \right\|_2 \quad (3.12)$$

Dove  $\mathcal{T}$  rappresenta l'intervallo di tempo di un ciclo di coltivazione della lattuga baby leaf. L'identificazione parametrica viene eseguita per trovare il miglior  $\hat{\underline{X}}$  nell'intervallo  $[\underline{X}_{\min}, \underline{X}_{\max}] \in \mathbb{R}^n$  minimizzando la funzione di costo  $\mathcal{J}$ . Il problema è definito come segue:

$$\begin{cases} \hat{\underline{X}} := \underset{\underline{X} \in [\underline{X}_{\min}, \underline{X}_{\max}]}{\text{argmin}} [\mathcal{J}(\underline{X})] \\ LAI(\tau) \geq 0 \\ -10 \leq \underline{X} \leq 10 \end{cases} \quad (3.13)$$

Poiché il  $LAI$  è un valore che indica il rapporto tra l'area fogliare e l'area coltivata, è stato vincolato a valori esclusivamente maggiori o uguali a zero, utilizzando come bound dei coefficienti l'intervallo  $\underline{X}_{\min} \in [-10, -10, .. -10]$ ,  $\underline{X}_{\max} \in [10, 10, ..10]$ .

Tutti i parametri utilizzati nel modello di identificazione white box sono riportati nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Parametri di input nel modello AVF

| Parametri | Valore | Unità                               |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| PAR       | 60     | $W \cdot m^{-2}$                    |
| PPFD      | 300    | $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ |
| Ta        | 25     | $^{\circ}C$                         |
| ia        | 65     | %                                   |
| Te        | 15     | $^{\circ}C$                         |
| ie        | 80     | %                                   |
| $\rho_0$  | 0.05   | -                                   |
| Ka        | 0.4    | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$       |
| $\eta$    | 0.52   | -                                   |

### 3.3 Risultati Numerici dell' Identificazione

Le simulazioni per le diverse approssimazioni sono state eseguite utilizzando un computer dotato di CPU Intel(R) Core(TM) i7-10750H, 16 GB di RAM e MATLAB versione R2020b. L'identificazione white-box è stata eseguita utilizzando l'algoritmo di ottimizzazione *fmincon*. La tolleranza per il criterio di arresto è stata impostata a  $10^{-6}$  e il numero massimo di valutazioni della funzione è stato impostato a 6000. L'algoritmo assume come valori iniziali un vettore di numeri  $\underline{X}_0$  generato con una distribuzione uniforme  $\underline{X}_0 \in [0, 1]$ . Per i limiti, è stato scelto il seguente intervallo  $\underline{X}_{min} \in [-10, -10, .. -10]$ ,  $\underline{X}_{max} \in [10, 10, ..10]$

Poiché la maggior parte dei carichi termici del sistema dipendono dall'*LAI*, una volta ipotizzata un'approssimazione del *LAI*, questa viene inserita come input nel modello di calcolo termico, che eseguirà la simulazione con *LAI* ipotizzato. Poiché il numero di giorni nel ciclo di coltivazione della lattuga è ipotizzato pari a 21, l'output del modello sarà un vettore di errore assoluto con esattamente 21 elementi. L'algoritmo di ottimizzazione mirerà a minimizzare la media di questo vettore (cioè la funzione di costo) al fine di ridurre la discrepanza tra il modello e i dati sperimentali.

Come si osserva in Figura 3.1, in ciascun caso, l'intervallo di variazione del *LAI* è compreso tra 3 e 5. L'approssimazione con la somma delle tangenti iperboliche, utilizzando 9 e 30 coefficienti, tende a oscillare in particolare nei giorni 6, 9 e 11. Con 60 coefficienti, le tangenti iperboliche mostrano un andamento più armonico del *LAI*. Le funzioni di base radiali hanno un picco intorno al giorno 9 e, aumentando il numero di coefficienti a 40, si osserva che anche le RBF mostrano un andamento più stabile del *LAI*. Per quanto riguarda le approssimazioni polinomiali e della somma dei seni,

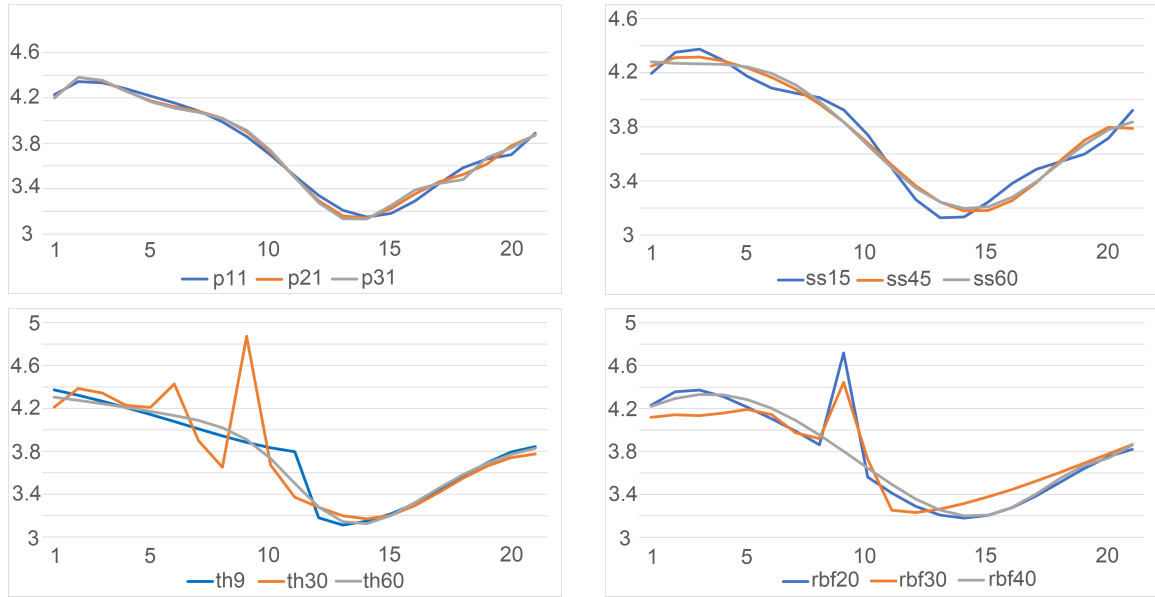


Figura 3.1: Approssimazione del  $LAI$  con diverse curve: polinomiale (in alto a sinistra), somma dei seni (in alto a destra), somma delle tangenti iperboliche (in basso a sinistra), funzione di base radiale (in basso a destra) con diverso numero di coefficienti

esse mostrano un andamento piuttosto simile del  $LAI$ . Questo inizia intorno a 4,2/4,3 e raggiunge un valore finale di circa 3,9.

Analizzando l'andamento della percentuale di riempimento dell'AVF nella Fig.3.2, possiamo osservare come l'andamento del  $LAI$  segua perfettamente le variazioni della superficie coltivata. In particolare, passa dalla saturazione dell'ambiente di coltivazione a valori compresi tra il 73% e il 94% di riempimento, mantenendo un valore medio dell'86%. A partire dal giorno 15, il sistema AVF ritorna alla piena capacità, come evidenziato anche dalla crescita del  $LAI$ . Nella Fig. 3.3 sono riportati alcuni risultati ottenuti con l'approssimazione p11 del  $LAI$ . In generale, il modello si adatta bene ai valori sperimentali in tutti e tre i parametri. Nel complesso si osserva una buona capacità del modello di riprodurre l'andamento della temperatura lungo tutto l'intervallo considerato. Le due curve risultano quasi sovrapposte nella prima parte del dominio (punti 1–8), evidenziando scarti contenuti e una corretta ricostruzione del gradiente iniziale decrescente. Nella zona centrale (intorno ai punti 9–13), dove si registra il minimo termico, il modello mantiene la tendenza generale ma presenta lievi discrepanze locali: in particolare tende a sottostimare leggermente il valore minimo rispetto ai dati sperimentali. Questo comportamento può essere attribuito alla natura globale dell'approssimazione polinomiale, che, pur garantendo elevata flessibilità grazie agli 11 coefficienti, può smussare variazioni locali più brusche.

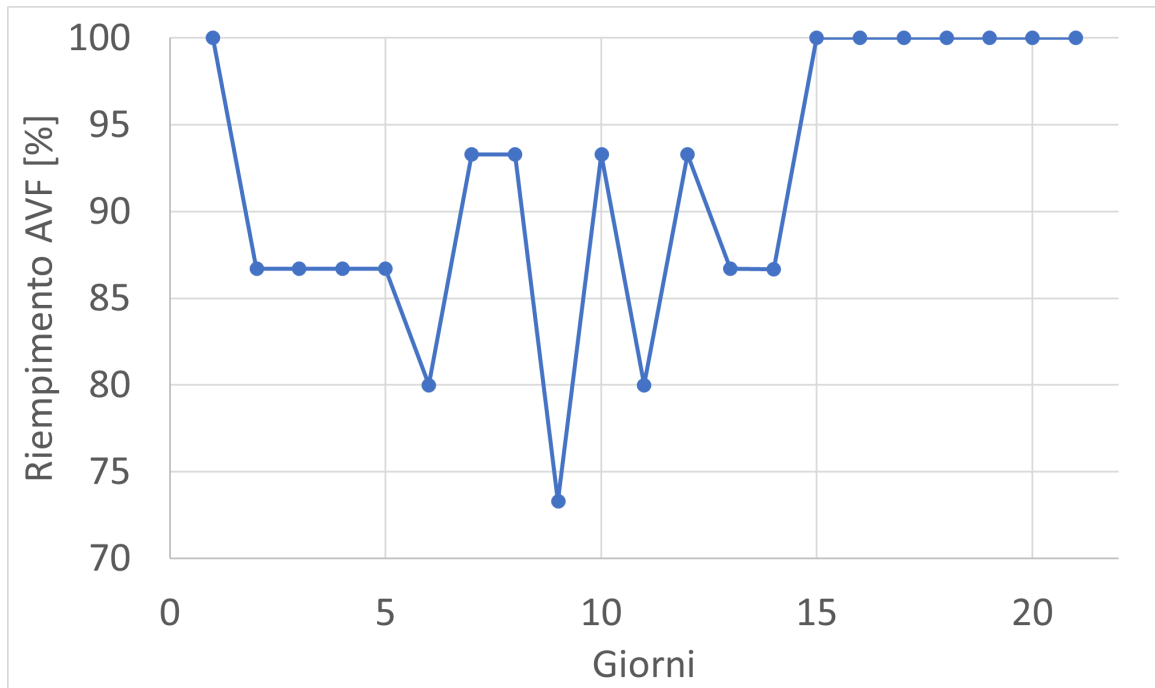


Figura 3.2: Percentuale di riempimento dell'AVF

Nella fase finale (punti 14–20) il modello riproduce correttamente l'inversione di tendenza e la successiva crescita della temperatura, con uno scostamento contenuto rispetto ai dati misurati. L'andamento crescente risulta ben catturato, a conferma della capacità dell'approssimazione polinomiale del  $LAI$  di descrivere adeguatamente la dinamica complessiva del sistema.

Per quanto riguarda il parametro umidità relativa, nel tratto iniziale (punti 1–4) il modello tende a sovrastimare leggermente i valori sperimentali, pur riproducendo correttamente il trend decrescente. In corrispondenza del primo minimo locale (intorno al punto 5) si osserva una discrepanza più marcata, con una sovrastima da parte del modello, seguita però da una buona ricostruzione del successivo picco (punti 6–7). La zona centrale (punti 8–13), caratterizzata da oscillazioni più pronunciate, evidenzia una buona capacità del modello di seguire l'andamento generale e le inversioni di tendenza. Tuttavia, in prossimità dei minimi locali (ad esempio punto 10 e punto 13) si nota una lieve sottostima o sovrastima alternata, indice di una leggera difficoltà nel riprodurre con precisione le variazioni più rapide. Nel tratto finale (punti 14–20) il modello riproduce in modo soddisfacente la crescita progressiva della portata massica, con scarti contenuti e andamento quasi parallelo alla curva sperimentale. La sovrapposizione tra le due curve diventa particolarmente buona negli ultimi punti, a conferma della coerenza globale dell'identificazione.

Il confronto delle portate d'aria mostra, nel tratto iniziale (punti 1–7), che il modello riproduce correttamente il trend crescente osservato nei dati sperimentali, pur presentando una lieve sottostima sistematica. Le due curve risultano pressoché parallele, segno che la dinamica generale è ben descritta, anche se con un piccolo scarto medio. Nella zona centrale (punti 8–14), caratterizzata da una crescita più marcata fino al massimo locale (intorno al punto 13), il modello segue in modo coerente l'andamento sperimentale e riesce a intercettare correttamente la posizione del picco. Si osserva tuttavia una leggera sovrastima nei pressi del massimo, probabilmente dovuta alla natura globale dell'approssimazione polinomiale, che tende a enfatizzare lievemente le curvature più ampie. Nel tratto finale (punti 15–20) entrambe le curve mostrano un andamento decrescente. Anche in questa fase il modello mantiene un buon accordo qualitativo con i dati, con scarti contenuti e andamento sostanzialmente sovrapposto. La differenza tra valori sperimentali e modellati rimane limitata e non evidenzia derive sistematiche.

Complessivamente, l'approssimazione polinomiale del  $LAI$  a 11 coefficienti consente una ricostruzione soddisfacente dei tre parametri analizzati, catturando correttamente sia le variazioni graduali sia le inversioni di tendenza. Le discrepanze risultano contenute e prevalentemente associate alle zone di massima curvatura, confermando una buona capacità del modello di rappresentare la dinamica termo-igrometrica del sistema.

Tabella 3.2: Prestazioni white box

| Approssimazione $LAI$ | $J(X)$   | Tempo di calcolo |
|-----------------------|----------|------------------|
| p11                   | 1,01E+02 | 4,12E+02         |
| p21                   | 9,85E+01 | 1,04E+02         |
| p30                   | 9,80E+01 | 1,52E+02         |
| ss15                  | 9,83E+01 | 3,35E+02         |
| ss45                  | 8,45E+01 | 3,52E+02         |
| ss60                  | 7,02E+01 | 3,84E+02         |
| th09                  | 9,64E+01 | 3,10E+02         |
| th30                  | 9,88E+01 | 3,43E+02         |
| th60                  | 7,34E+01 | 3,57E+02         |
| rbf20                 | 9,21E+01 | 3,39E+02         |
| rbf30                 | 8,38E+01 | 3,35E+02         |
| rbf40                 | 7,11E+01 | 2,29E+02         |

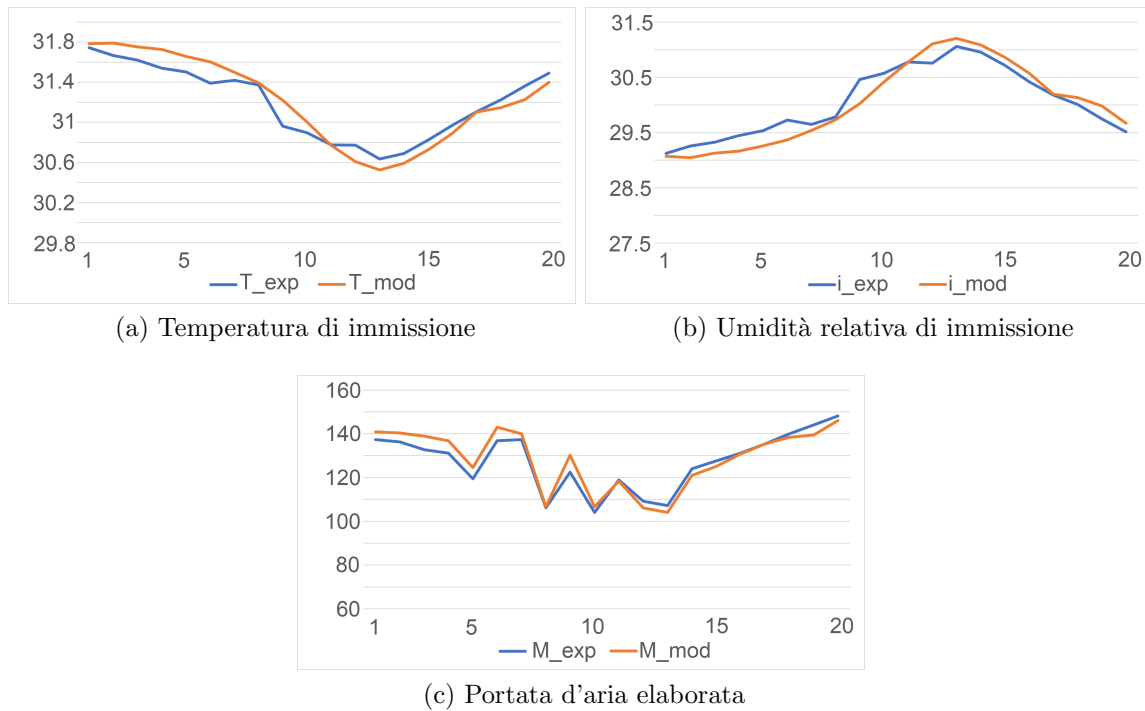


Figura 3.3: Confronto tra i parametri sperimentali e i valori stimati con modello white-box p11: (a) temperatura [°C], (b) umidità relativa [%], (c) portata d'aria [kg/s].

La Tabella 3.2 riporta il confronto tra le diverse strategie di approssimazione del  $LAI$  in termini di valore della funzione costo  $J(X)$  e tempo di calcolo. La funzione

costo rappresenta l'errore complessivo tra modello e dati sperimentali, mentre il tempo di calcolo è indicativo della complessità computazionale dell'identificazione.

Le approssimazioni polinomiali mostrano un miglioramento progressivo passando da 11 a 30 coefficienti. L'incremento del numero di coefficienti riduce leggermente la funzione costo, ma con un tempo di calcolo che non cresce in modo significativo. Tuttavia, il miglioramento in termini di accuratezza rimane limitato, suggerendo una capacità descrittiva moderata della base polinomiale.

Le approssimazioni armoniche mostrano un comportamento interessante: ss15 e ss45 producono valori di  $J$  simili a quelli polinomiali. ss60 riduce significativamente la funzione costo. L'aumento del numero di termini armonici migliora sensibilmente la capacità di adattamento, ma comporta tempi di calcolo più elevati ( $\approx 350 - 380$  s). Questo indica una maggiore flessibilità della rappresentazione, a fronte di una maggiore complessità numerica.

Le approssimazioni con tangenti iperboliche mostrano prestazioni intermedie per th09 e th30. Il miglioramento è significativo per th60. Anche in questo caso, l'aumento del numero di termini migliora l'accuratezza, con tempi di calcolo comparabili alla base armonica.

Le RBF risultano tra le più efficaci. L'approssimazione rbf40 offre una delle migliori performance in termini di funzione costo, con un tempo di calcolo significativamente inferiore rispetto a ss60 e th60 ( $\approx 229$  s contro  $\approx 380$  s). Questo suggerisce un miglior compromesso tra accuratezza e costo computazionale.

Dal confronto emerge che le basi polinomiali risultano meno performanti in termini di riduzione dell'errore. Le basi armoniche e iperboliche migliorano sensibilmente con l'aumento dei termini, ma con elevato costo computazionale. Le RBF offrono il miglior compromesso tra accuratezza e tempo di calcolo. In particolare, le configurazioni ss60, th60 e rbf40 forniscono i valori più bassi della funzione costo, ma l'approccio RBF appare preferibile in un'ottica di efficienza computazionale.

Nelle Figure 3.4 e 3.5, ad esempio, possiamo osservare come funziona l'ottimizzatore. La tendenza decrescente della funzione di costo e la variazione di un coefficiente ad ogni iterazione mirano a minimizzare l'errore.

Per quanto riguarda l'andamento della funzione costo, c'è una discesa quasi verticale nelle prime iterazioni (0-10): il valore della funzione di costo passa da circa 4900 a meno di 500 in pochissimi step. L'algoritmo ha individuato immediatamente la "direzione di massima discesa".

Dalla iterazione 10 alla 40 la curva cambia pendenza; qui il miglioramento è più lento. L'algoritmo sta esplorando la valle dell'ottimo. Dall'iterazione 50 in poi, la

curva è praticamente piatta. `fmincon` ha smesso di trovare miglioramenti significativi. Anche se l'ottimizzazione è proseguita fino a oltre 140 iterazioni, il grosso del lavoro era già fatto al 50esimo step.

Nella Figura 3.4 è mostrato l'andamento del coefficiente  $x_1$  del *LAI* in una approssimazione polinomiale. Nelle primissime iterazioni (Fase Esplorativa Iniziale), notiamo una forte oscillazione: il valore scende bruscamente verso 6 per poi risalire. Questo suggerisce che il punto iniziale (initial guess) non era vicinissimo all'ottimo. L'algoritmo ha incontrato gradienti elevati o ha testato i limiti dei vincoli (constraints) imposti, cercando di capire la "forma" della funzione di costo. Dopo la turbolenza iniziale (Ricerca del Trend), l'algoritmo individua una direzione di crescita costante. Tra l'iterazione 25 e 30 c'è un gradino piuttosto netto, segno che `fmincon` (probabilmente usando un metodo Interior-Point o SQP) ha superato una zona di "plateau" o ha cambiato radicalmente la dimensione del passo (step size) per avvicinarsi alla regione ottimale. Nella fase successiva (Fase di Convergenza) il parametro inizia a stabilizzarsi intorno a un valore di circa 13. Le piccole "gobbe" che vedi indicano che l'algoritmo sta effettuando dei micro-aggiustamenti per soddisfare contemporaneamente sia la minimizzazione della funzione obiettivo che il rispetto dei vincoli. Dall'iterazione 70 in poi, la curva è praticamente piatta. Questo è l'indicatore classico di convergenza avvenuta. La variazione del parametro tra un'iterazione e l'altra è inferiore alla tolleranza impostata (StepTolerance). Il gradiente della funzione è diventato trascurabile o l'algoritmo è "appoggiato" su un vincolo attivo.

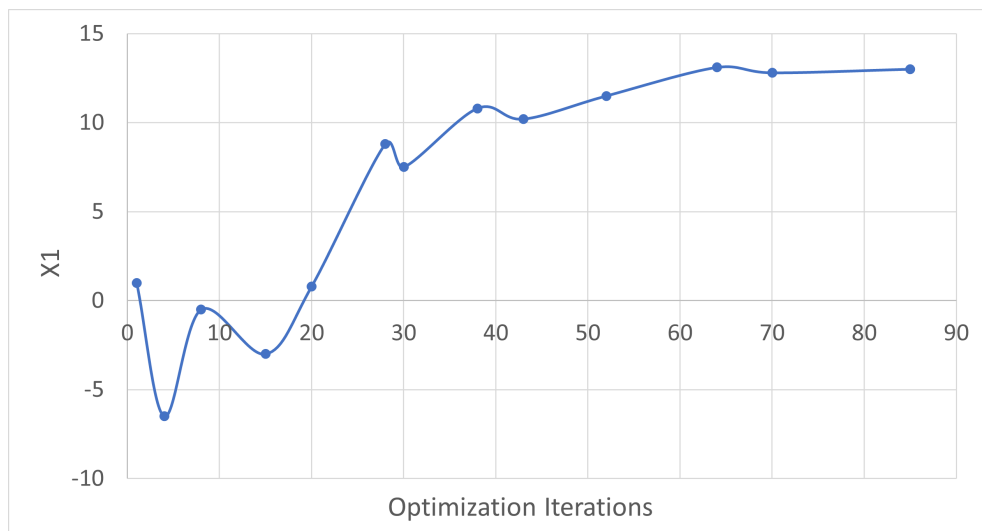


Figura 3.4: Andamento del coefficiente  $x_1$  del *LAI* (approssimazione polinomiale) ad ogni iterazione dell'ottimizzazione



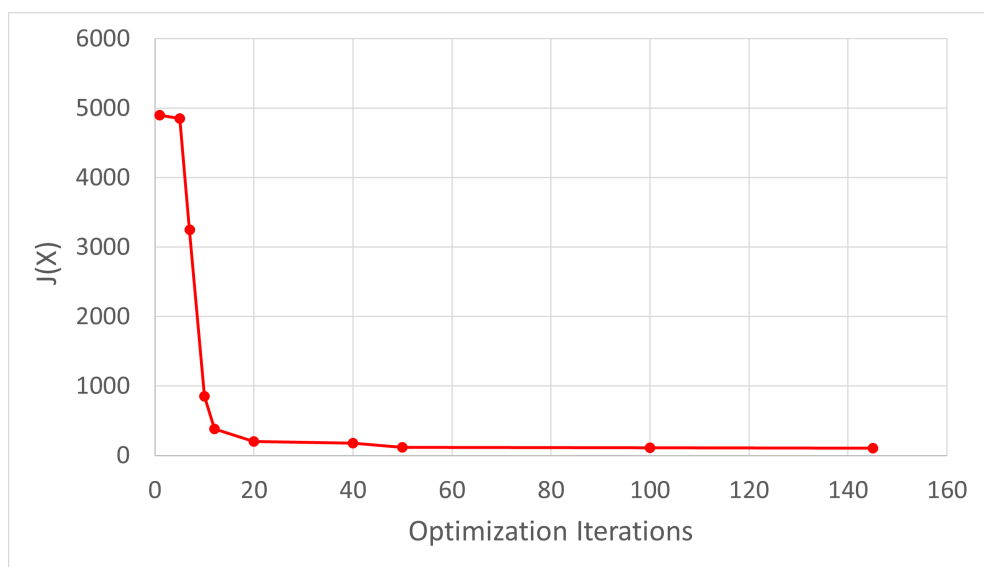


Figura 3.5: Andamento della funzione costo  $J(X)$

## Capitolo 4

# Modulo AVF come Sistema di Supporto Vitale nello Spazio

### 4.1 Introduzione ai sistemi di supporto vitale

L'esplorazione spaziale di lunga durata impone lo sviluppo di sistemi di supporto vitale (Life Support Systems, LSS) in grado di garantire autonomia operativa, riduzione della dipendenza dai rifornimenti terrestri e sostenibilità energetica. Nelle missioni in orbita bassa terrestre (LEO), così come nelle future missioni lunari e marziane, la produzione biologica controllata di biomassa vegetale rappresenta una componente strategica per la chiusura parziale o totale dei cicli di materia.

In questo contesto, i sistemi di coltivazione in ambiente confinato non svolgono esclusivamente una funzione alimentare, ma contribuiscono attivamente alla rigenerazione dell'atmosfera, al riciclo dell'acqua e al mantenimento dell'equilibrio psico-fisiologico dell'equipaggio. Le piante, attraverso la fotosintesi, consentono infatti la conversione della  $CO_2$  in  $O_2$  e biomassa, contribuendo alla stabilizzazione della composizione dell'aria interna e alla riduzione del carico sui sistemi chimico-fisici tradizionali.

La Serra Adattiva Verticale (AVF), sviluppata nell'ambito del presente lavoro per applicazioni terrestri ad alta efficienza energetica, presenta caratteristiche strutturali e funzionali potenzialmente compatibili con un'evoluzione verso sistemi di coltivazione per ambienti spaziali. In particolare, la configurazione modulare a vani verticalmente adattivi, capaci di modificare il volume disponibile in funzione della crescita della pianta, consente una gestione dinamica dello spazio coltivato, con implicazioni dirette sull'ottimizzazione del consumo energetico e sul controllo termo-igrometrico ma con implicazioni connesse anche al recupero delle risorse come l'acqua.

In ambiente orbitale, i vincoli progettuali assumono carattere prioritario:

- limitazione di volume e peso;

- consumo energetico strettamente vincolato;
- necessità di elevata affidabilità;
- gestione in condizioni di microgravità;
- integrazione con sistemi chiusi di riciclo (Closed Ecological Life Support Systems – CELSS).

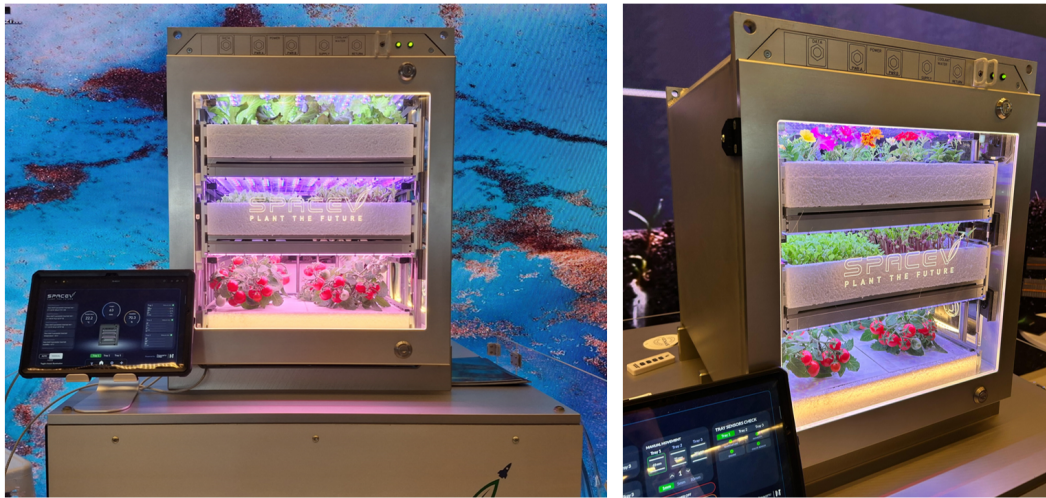


Figura 4.1: Prototipo della serra verticale adattiva spaziale sviluppato da Space V, spinoff dell'Università di Genova.

La variabilità volumetrica introdotta dall'AVF permette, in linea teorica, di ridurre il volume atmosferico da condizionare nelle fasi iniziali di crescita, minimizzando la potenza richiesta per ventilazione forzata. Ne conseguirebbe un potenziale incremento dell'efficienza energetica complessiva del comparto biologico del LSS. Il vantaggio della serra adattiva risiede anche nell'aumento dei ripiani coltivabili a parità di volume totale della serra, caratteristica particolarmente utile nel caso di applicazioni spaziali, in cui il volume disponibile è molto limitato e ogni cm cubo di spazio condizionato ha enormi costi.



2014. E' stata costruita da ORBITEC, una piccola azienda di Madison, Wisconsin, che è stata acquisita da Sierra Nevada Corporation (SNC) nel 2014 nell'ambito del programma NASA Small Business Innovation Research (SBIR). Questo sistema compatto e pieghevole è stato progettato per studiare la crescita delle piante nello spazio e fornire agli astronauti cibo fresco durante le missioni di lunga durata. Ha le dimensioni di circa 45 cm di larghezza, 37 cm di profondità e 45 cm di altezza quando è aperto. Il cuore del sistema è costituito da LED rossi, blu e verdi regolabili, che forniscono la luce necessaria per la fotosintesi, mimando le condizioni ottimali per la crescita delle piante. Le colture crescono in speciali "substrati" contenenti un supporto adatto e i semi, inseriti in una base che provvede all'apporto di acqua e nutrienti. L'irrigazione avviene attraverso un ingegnoso sistema passivo basato sulla capillarità, che sfrutta la tensione superficiale dell'acqua, in condizioni di microgravità, per distribuirla alle radici. Un sistema di ventilazione integrato aiuta a controllare temperatura e umidità. Veggie si è concentrato principalmente sulla coltivazione di verdure a foglia verde come lattuga, cavolo cinese e senape, oltre a poche altre piante di piccole dimensioni.



Advanced Astroculture Chamber (ADVASC)



Biomass Production Chamber (NASA 1988-2000)



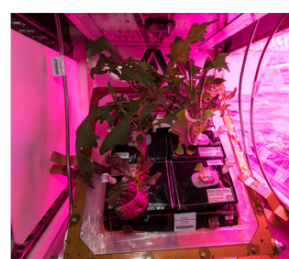
Advanced Plant Habitat (APH)



European Modular Cultivation System (EMCS)



Plant Experiment Unit (PEU)



Veggie (NASA)

Figura 4.3: Esperimenti di coltivazione in ambito spaziale.

Nel febbraio 2022, un veicolo spaziale Cygnus ha testato sulla ISS un sistema sperimentale di coltivazione sperimentale chiamato XROOTS (eXposed Root On-Orbit Test System), costruito da Sierra Space, per la coltivazione idroponica di piante nello spazio. Sulla ISS esiste anche una struttura più avanzata, l'Advanced Plant Habitat (APH), progettata congiuntamente dagli ingegneri della SNC e della NASA. Dalla documentazione di dominio pubblico, l'APH controlla e regola i parametri della zona di coltura, quali temperatura, umidità, livelli di luce, spettro luminoso e fotoperiodi, flussi d'aria e di CO<sub>2</sub>. In Europa, l'ESA ha una tabella di marcia concordata con l'International Space Exploration Coordination Group e gestisce dal 2015 il programma Melissa per lo sviluppo di ecosistemi artificiali a supporto di missioni e voli abitati proiettati nel lungo termine a Marte. Da Melissa ha avuto origine il progetto ReBUS (In situ Resource Bio-Utilization system for Space) dell'ASI per promuovere una linea di ricerca nazionale sui sistemi biorigenerativi, in supporto all'esplorazione umana dello spazio, coinvolgendo il mondo accademico e industriale. L'ENEA ha sviluppato con un finanziamento ESA un progetto di ricerca V-GELM (Virtual Greenhouse Experimental Lunar Module) per sperimentare tecniche di coltivazione idroponica innovative abbinate ad esperimenti virtuali per il supporto alla vita degli astronauti nelle future missioni di lungo periodo.

## **4.2 Microclimatizzazione e Recupero del Condensato**

Un ambiente ideale in cui testare il modulo adattivo AVF potrebbe essere la stazione spaziale internazionale (ISS). In un sistema di supporto vitale bioregenerativo, la gestione dell'umidità non è solo una necessità di comfort ambientale, ma il fulcro del ciclo dell'acqua. Le piante, attraverso la traspirazione, convertono l'acqua liquida (nutriente) in vapore acqueo, assorbendo energia termica (calore latente di evaporazione). In questa sezione, il modulo AVF viene modellato non solo come unità produttiva, ma come un condensatore biologico. A differenza delle applicazioni terrestri, dove si utilizzano refrigeranti standard o aria esterna, la modellazione qui proposta prevede l'interfacciamento del modulo AVF con il circuito idraulico di termoregolazione della ISS (tipicamente il Moderate Temperature Loop - MTL) e lo sviluppo di un sistema di microclimatizzazione apposito. Essendo uno studio preliminare si assume che l'effetto della microgravità sul sistema AVF sia trascurabile essendo che all'interno del modulo AVF, il controllo termo-igrometrico è affidato a un sistema di ventilazione forzata. Il gradiente di pressione imposto tra i condotti di mandata e ripresa crea un





Figura 4.4: Render di un modulo AVF spaziale

campo di velocità dell'aria che domina il trasporto di calore e vapore. Il trasporto avvevativo sovrasta i fenomeni diffusivi che sarebbero altrimenti critici in microgravità, rendendo il comportamento fluidodinamico dell'aria modellabile con le equazioni di Navier-Stokes standard per flussi forzati. Il problema della fluttuazione dei liquidi e della biomassa è risolto a livello progettuale visto il vincolo radicale: le piante sono fisicamente ancorate al substrato o a cartucce di contenimento che ne impediscono lo spostamento.

Nello seguente studio si è analizzato un modulo AVF con superficie quadrata di lat 25x25cm. In Figura 4.4 si riporta un render di un possibile modulo spaziale AVF da integrare sulla stazione spaziale.

Per analizzare il consumo energetico legato alla microclimatizzazione del sistema e il possibile recupero di acqua dall'umidità dell'aria è necessario innanzitutto stabilire delle condizioni termoigrometriche e illuminotecniche di set point da garantire nel sistema per ottimizzare l'ambiente di crescita delle specie coltivate. Le condizioni climatiche all'esterno del sistema di coltivazione (cioè il range in cui operano gli astronauti sulla ISS) sono comprese in un range di temperatura tra 18,3 – 23,9 °C e di umidità relativa tra 50 – 60% [59]. Per osservare il massimo consumo richiesto da un eventuale riscaldatore posto a monte della camera di coltivazione si assumeranno, per il momento, condizioni termoigrometriche esterne stazionarie pari a  $T_e=18,3^{\circ}\text{C}$  e  $i_e=50\%$ . Tutte le simulazioni sono effettuate su un ciclo colturale della durata di 30 giorni (compresi 5 giorni circa di germinazione) prendendo come riferimento lattuga

baby leaf. Nella Tabella 4.1 sono riportate le condizioni di set point per la crescita ideale della lattuga divise per fase diurna e notturna.

Tabella 4.1: Condizioni di Set Point in fase di luce e buio

| Parametri | LUCE                                     | BUIO  |
|-----------|------------------------------------------|-------|
| T         | 25 °C                                    | 22 °C |
| i         | 70%                                      | 80%   |
| PAR       | 60 W/m <sup>2</sup>                      | 0     |
| PPFD      | 300 $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ | 0     |
| Durata    | 16 h                                     | 8 h   |

#### 4.2.1 Sistema di Microclimatizzazione

Il sistema pensato per questo scopo è costituito da uno scambiatore di calore freddo detto "cold plate" e da un riscaldatore a resistenza elettrica che attua il riscaldamento sensibile. Questo perché l'impiego di un sistema di climatizzazione a ciclo frigorifero a compressione di vapore per un modulo di coltivazione sulla ISS presenta criticità tecniche e di sicurezza tali da renderlo, nella quasi totalità dei casi, inapplicabile per:

- **Rischio Leak:** L'uso di fluidi refrigeranti (come gli idrofluorocarburi o l'ammoniaca, quest'ultima usata solo nei loop esterni della ISS) all'interno del volume abitabile rappresenta un rischio critico. Un'eventuale perdita saturerebbe l'ambiente senza possibilità di ventilazione esterna, mettendo a rischio la salute dell'equipaggio.
- **Normative NASA/ESA:** Per l'interno dei moduli (Intra-Vehicular Activity - IVA), le agenzie spaziali impongono standard rigorosissimi. L'acqua è il fluido termovettore d'elezione per la sua inerzia chimica e totale assenza di tossicità.

L'atmosfera della ISS è un sistema chiuso e ricircolato. Inoltre, essendo che un ciclo frigorifero non "elimina" il calore ma lo sposta, per raffreddare la serra, il condizionatore dovrebbe espellere il calore rimosso (più il calore generato dal compressore stesso) nell'aria dell'abitacolo. Questo sovraccaricherebbe il sistema di condizionamento centrale della ISS. Utilizzando invece uno scambiatore a piastre acqua-aria collegato direttamente al Moderate Temperature Loop (MTL) della ISS, il calore della serra viene trasferito direttamente ai radiatori esterni della stazione, ottimizzando l'efficienza complessiva del sistema senza riscaldare l'aria interna dei moduli.



Pertanto, la cold plate consente di aggirare i limiti imposti dalla ISS, pur avendo delle limitazioni sul grado di raffreddamento e deumidificazione. In particolare, essendo che la cold plate preleva acqua direttamente dal circuito di raffreddamento della ISS questa avrà i vincoli di temperatura di quest'ultima. Il range di temperatura a cui oscilla il loop dell'acqua di raffreddamento è 16-24°C [60]. L'impianto, osservabile in Figura 4.5, preleva l'aria dalla ISS e la manda all'interno della cold plate, se vi è necessità di ridurre il contenuto igrometrico, altrimenti una valvola a tre vie regola la portata d'aria facendola passare direttamente attraverso il riscaldatore. Essendo il volume di controllo molto contenuto è possibile gestire l'umidità con la ventilazione meccanica.

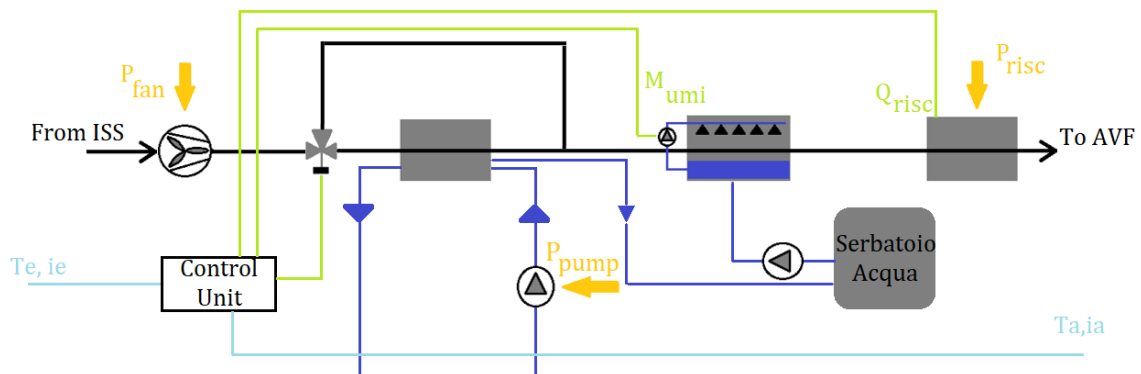


Figura 4.5: Sistema di microclimatizzazione

### 4.3 Simulazioni e Risultati

Sia la temperatura che l'umidità assoluta nei primi giorni sono simili ai valori di set point selezionato per l'ambiente di coltivazione. Nei primi giorni di crescita, infatti, i carichi termici legati alle piantine sono molto piccoli, quasi trascurabili, e per tale motivo la portata d'aria non subisce trasformazioni termodinamiche rilevanti. I valori di temperatura all'immissione, osservabili in Figura 4.6, seguono un andamento sigmoidale; dal bilancio di energia si ricava il contenuto entalpico ottimale dell'aria da immettere nel sistema per garantire il set point di progetto.

La portata d'aria ha un andamento crescente giorno dopo giorno, tale incremento è necessario per far fronte alla portata di vapore traspirata dalle piante che contribuisce ad aggravare il carico latente legato all'umidità delle piante. Maggiore è la traspirazione delle piante e maggiore dovrà essere la portata ventilata per smaltire l'umidità. Il valore medio della portata d'aria sui 30 giorni di coltivazione è di  $1,5 \text{ m}^3/h$ . In Fig.4.8

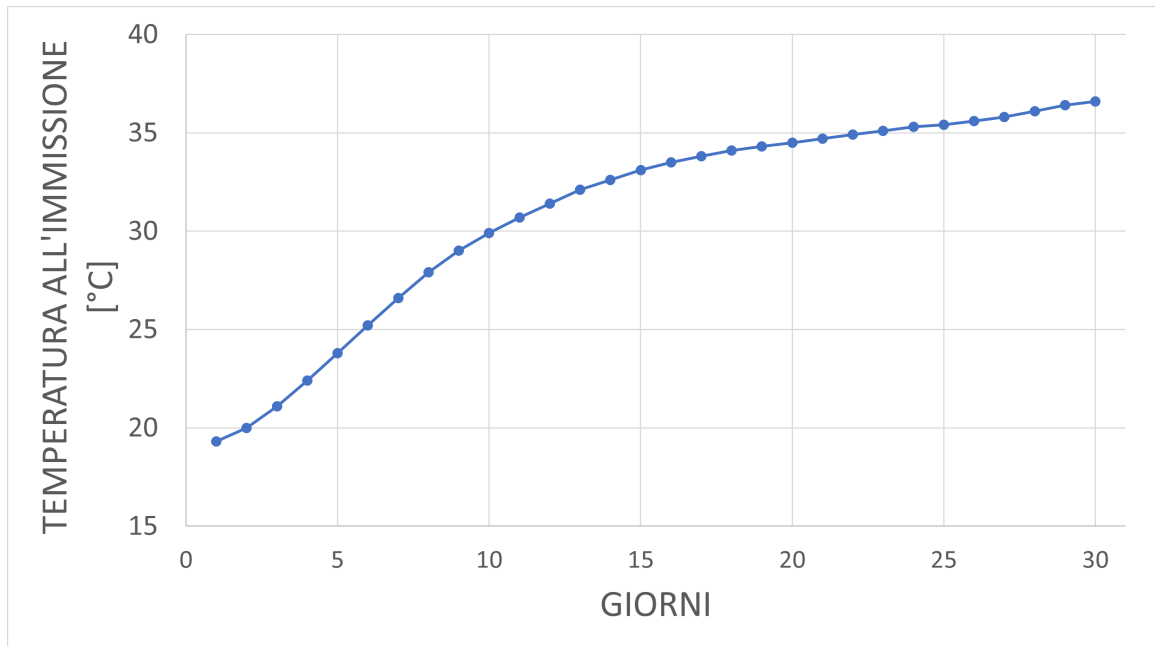


Figura 4.6: Andamento della Temperatura all'immissione nel modulo AVF

e 4.8 si osservano l'andamento della portata d'aria elaborata e la variazione del volume condizionato; tale volume è soggetto a un costante incremento. Il principio adattivo, infatti, consente di modificare l'altezza del vano climatizzato in funzione delle necessità di crescita della pianta. Il volume condizionato, infatti, segue proprio l'andamento dell'altezza della pianta, come si può osservare in Fig.4.7. Quest'ultima arriva a toccare un tetto massimo di 20cm. Considerando anche la distanza da lasciare tra la canopia e il pannello millefori si avrà un'altezza totale massima del vano di coltivazione pari a 21 cm.

Nella precamera è opportuno prevedere una resistenza elettrica per il riscaldamento sensibile dell'aria da immettere nella camera e un ventilatore a portata variabile per movimentare la portata d'aria necessaria. Il comportamento del riscaldatore durante il ciclo di coltivazione è raffigurato in Fig.4.10. In particolare, il consumo legato al riscaldamento dell'aria è direttamente proporzionale all'andamento della temperatura all'immissione. In Tabella 4.2 sono riportati i consumi del riscaldatore, la portata media d'aria elaborata e i consumi di illuminazione artificiale.

Come detto, una possibile strategia di recupero delle risorse idriche, escludendo un sistema a pompa di calore, è utilizzo di una cold plate che viene raffreddata dal circuito di raffreddamento della ISS. È noto che tale circuito ha un range di temperatura che oscilla dai 16 ai 23°C. Perché l'acqua condensi è necessario che la temperatura della cold plate scenda al di sotto della temperatura di dew point dell'aria. Assumendo che

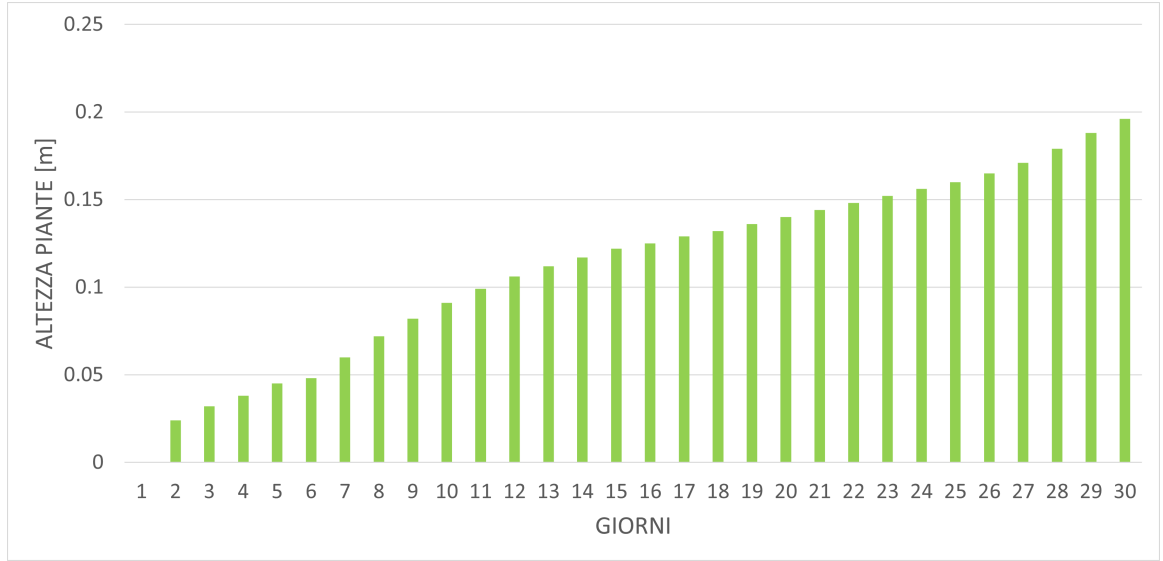


Figura 4.7: Andamento dell'altezza delle piante nel tempo

Tabella 4.2: Consumi energetici e parametri operativi del modulo AVF nelle fasi di luce e buio.

| Parametro                                | Luce | Buio |
|------------------------------------------|------|------|
| Riscaldamento [kWh]                      | 3,43 | 0,76 |
| Portata d'aria media [m <sup>3</sup> /h] | 1,43 | 0,41 |
| Illuminazione [kWh]                      | 3,60 | 0    |

l'aria all'interno del vano sia in condizioni stazionarie avrà una temperatura di dew point stabile pari a 19°C circa con il set point in fase di illuminazione e intorno ai 18°C con il set point in fase di buio. Essendo ancora incerto l'andamento della temperatura dell'acqua di raffreddamento in 24h si è ipotizzato un andamento sinusoidale con i limiti noti, come si osserva in Fig. 4.11. Tutte le volte che la temperatura dell'acqua (Curva blu) si trova al di sotto del dew point (curva arancione) si verifica condensazione con una relazione che dipende sia dalla portata d'aria che lambisce la cold plate e sia dal salto entalpico che subisce l'aria.

$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_{as} \cdot (y_1 - y_2) \quad (4.1)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{as} \cdot (h_1 - h_2) \quad (4.2)$$

Noto il gradiente di temperatura, infatti, è possibile stabilire il punto termodinamico sul diagramma ASHRAE e individuare il valore di umidità assoluta finale  $y_2$ .

L'andamento dei valori di acqua recuperata è proporzionale al gradiente di temperatura tra l'acqua del circuito di raffreddamento e il dew point dell'aria. In Fig. 4.12

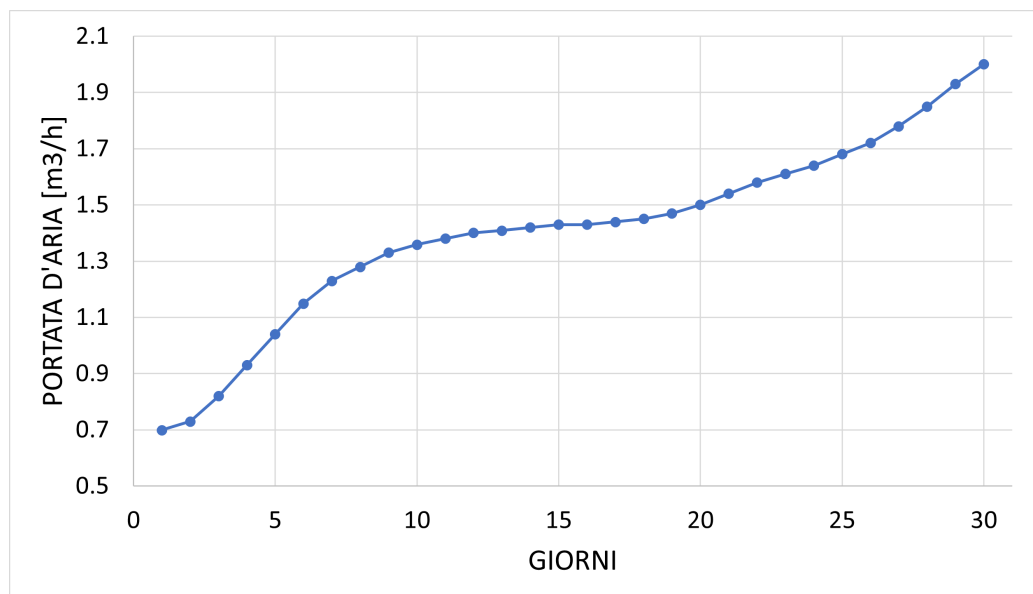


Figura 4.8: Portata d'aria elaborata dal sistema di climatizzazione

infatti si osservano le stesse gobbe presenti tra le ore 5:00 e 10:00 e tra le ore 15:00 e 20:00.

In particolare, la differenza tra i due picchi è dovuta alla durata del fotoperiodo. Una maggiore permanenza nelle condizioni termoigrometriche presenti in fase di illuminazione garantisce una maggiore presenza di acqua nell'aria che passa nella cold plate e di conseguenza un maggior recupero. In queste condizioni di fotoperiodo e con

Tabella 4.3: Recupero idrico per ciclo di coltivazione

| Parametro            | Luce | Buio  |
|----------------------|------|-------|
| Acqua condensata [L] | 0,38 | 0,065 |
| Dew point [°C]       | 19,1 | 18,4  |

l'andamento della temperatura dell'acqua di raffreddamento ipotizzato in Fig.4.11, la cold plate consentirebbe un recupero di 0,45l di acqua per singolo ciclo di coltivazione in un vano. In Tabella 4.3 sono presenti i valori di acqua condensata divisa per fase di luce e buio e i valori del punto di rugiada dell'aria. Quindi un parametro molto importante che sancisce quanta acqua andrà a condensare sulla cold plate è il tempo in cui la temperatura dell'acqua di raffreddamento si trova al di sotto della temperatura di dew point dell'aria. Per capire cosa accade aumentando la durata del fotoperiodo si osservi Fig.4.13. Come era prevedibile, un aumento della durata del fotoperiodo ha un effetto positivo sul recupero di acqua nella cold plate, tuttavia, non

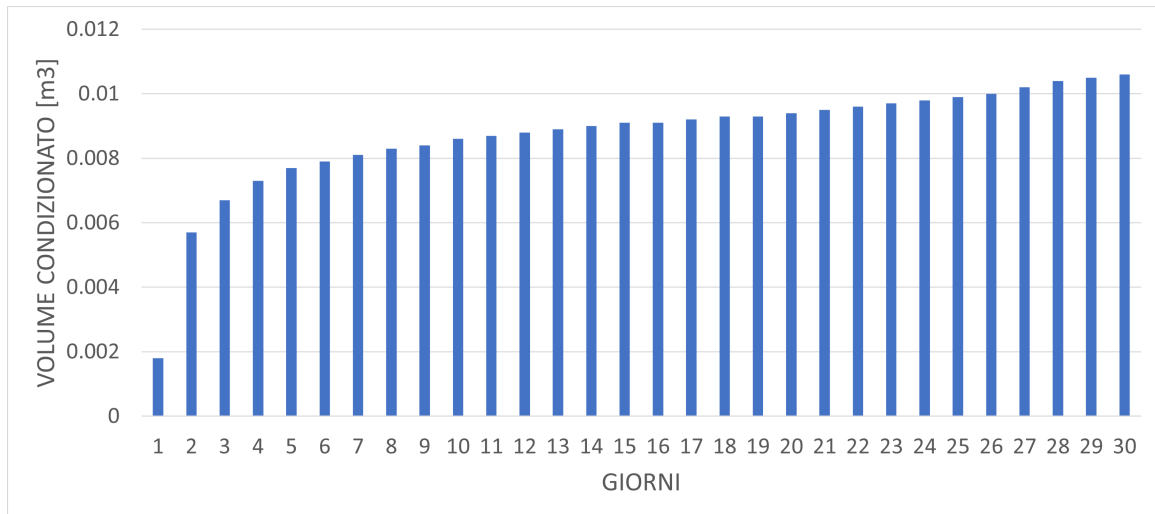


Figura 4.9: Andamento del volume condizionato

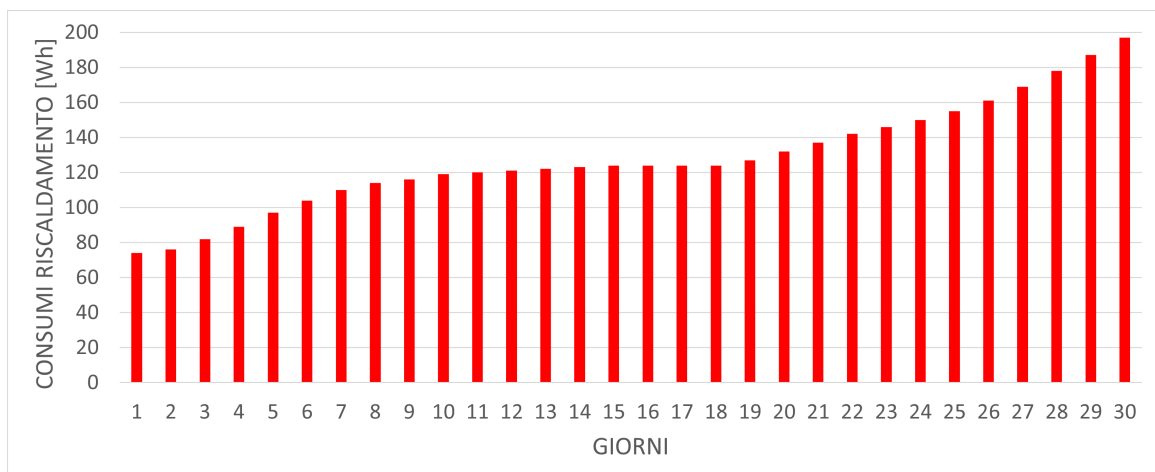


Figura 4.10: Andamento dei consumi del riscaldatore

avrebbe senso aumentare il fotoperiodo senza tenere conto della distribuzione della temperatura dell'acqua di raffreddamento. Ricordiamo, infatti, che la condensazione avviene solo quando la temperatura dell'acqua si trova al di sotto del dew point dell'aria. Di conseguenza, avere un fotoperiodo di 24h sarebbe comunque inutile se la temperatura dell'acqua si trovasse al di sopra del dew point dell'aria. Il set point in fase di illuminazione consente all'aria di immagazzinare più acqua e quindi è possibile recuperarne di più (come si evince anche dal dew point maggiore). Tra gli svantaggi vi è senza dubbio il maggior dispendio energetico legato ai maggiori carichi termici delle piante in fase di fotosintesi. Il recupero di acqua grazie alla cold plate, in ultima analisi, mostra valori interessanti, specialmente per applicazioni in cui la presenza di acqua è indispensabile. I parametri fondamentali per tale recupero sono:

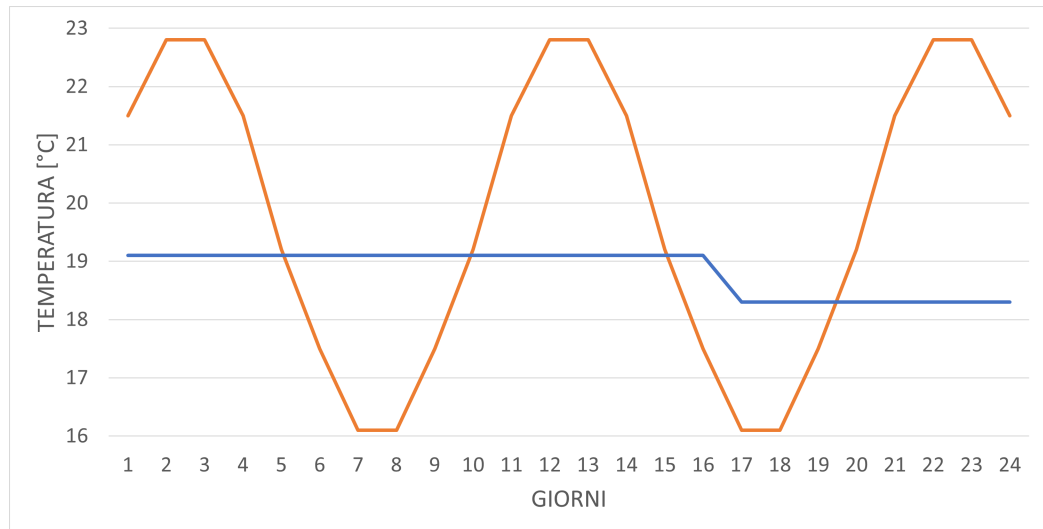


Figura 4.11: Temperatura dell'acqua di raffreddamento (in arancione) e dew point dell'aria (in blu)

Tabella 4.4: Recupero idrico, consumi di riscaldamento e illuminazione in funzione del fotoperiodo

| FOTOPERIODO          | 16h  | 18h  | 20h  |
|----------------------|------|------|------|
| Acqua condensata [l] | 0.45 | 0.60 | 0.64 |
| Riscaldamento [kWh]  | 3.70 | 3.91 | 4.09 |
| Illuminazione [kWh]  | 3.60 | 4.05 | 4.50 |

- Temperatura dell'acqua di raffreddamento;
- Durata del fotoperiodo;
- Condizioni termoigrometriche di set point.

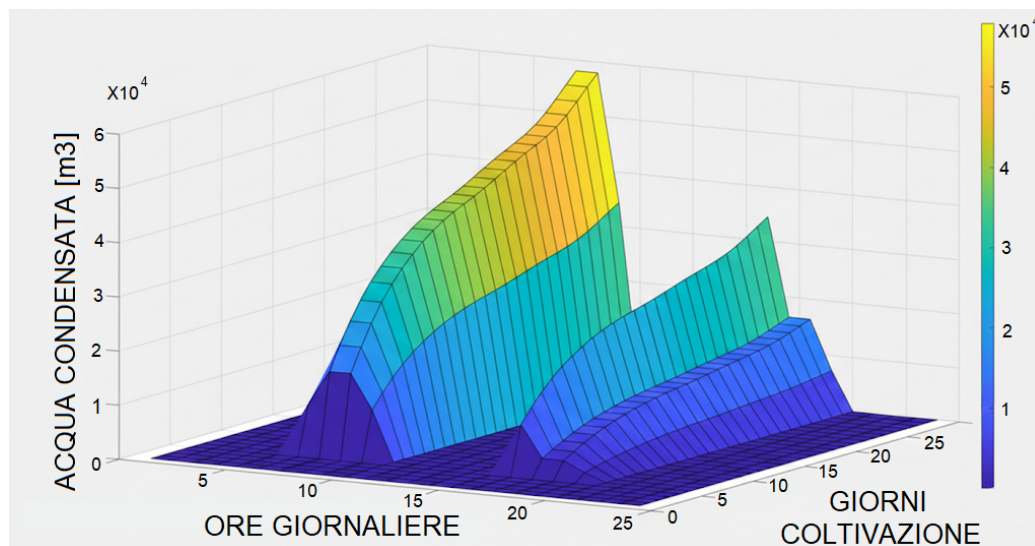


Figura 4.12: Acqua condensata sulla cold plate in ogni ora del giorno (Fotoperiodo=16h)

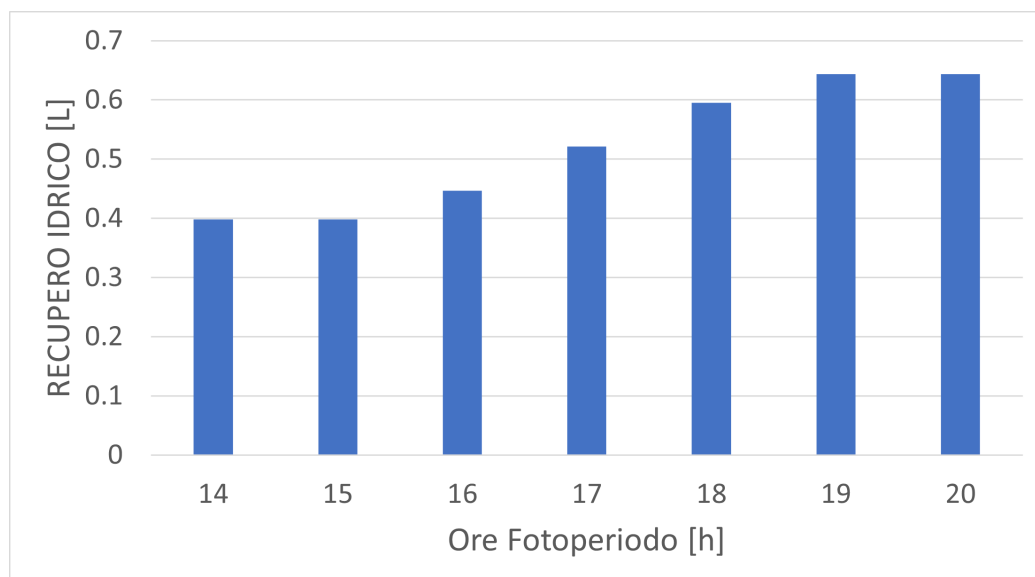


Figura 4.13: Litri di acqua recuperata per singolo ciclo di coltivazione in un vano confrontata su diversi fotoperiodi

## Capitolo 5

# Confronto Termoenergetico tra Serre Adattive Piane e Serre Piane Tradizionali

Le serre piane (o a campata) rappresentano la tipologia costruttiva più diffusa a livello mondiale per la produzione orticola protetta. Sebbene le vertical farm stiano guadagnando terreno nei contesti urbani, la stragrande maggioranza della produzione agricola sotto copertura avviene tuttora in strutture orizzontali caratterizzate da ampie superfici e volumi statici generosi. Tuttavia, queste strutture soffrono di un'inefficienza termodinamica intrinseca: il volume d'aria tra la chioma della pianta e il colmo della serra è spesso eccessivo, specialmente nelle prime fasi del ciclo colturale. Questo "volume morto" agisce come un enorme serbatoio termico che deve essere riscaldato o raffreddato, comportando costi energetici elevatissimi. L'estensione del principio di adattività alle serre piane prevede l'integrazione di un piano orizzontale mobile (spesso definito "cielo mobile" o "falso soffitto dinamico"). A differenza dei comuni schermi termici o ombreggianti, il cielo mobile adattivo è progettato per agire come una barriera fisica a tenuta, capace di variare l'altezza del soffitto in funzione dello stadio fenologico della coltura. Questa riconfigurazione volumetrica permette di ridurre il volume di climatizzazione: Minimizzando lo spazio da riscaldare durante i mesi invernali o da deumidificare.

Uno degli aspetti più promettenti di questa tecnologia riguarda la Retrofitting Architecture. Data la capillare presenza di serre piane in tutto il mondo, lo sviluppo di kit di conversione adattivi rappresenta una frontiera di mercato e di sostenibilità senza precedenti.



- Sfruttamento delle Strutture Portanti: Le carpenterie metalliche esistenti possono essere utilizzate come binari o supporti per i meccanismi di sollevamento del soffitto mobile.
- Riduzione dell'Impatto Ambientale: Invece di costruire nuove strutture ad alta tecnologia, la conversione permette di trasformare una serra convenzionale in un sistema smart ad alta efficienza con investimenti di capitale (CAPEX) significativamente inferiori.
- Transizione Energetica: La trasformazione di una serra piana in adattiva può ridurre il fabbisogno termico specifico.

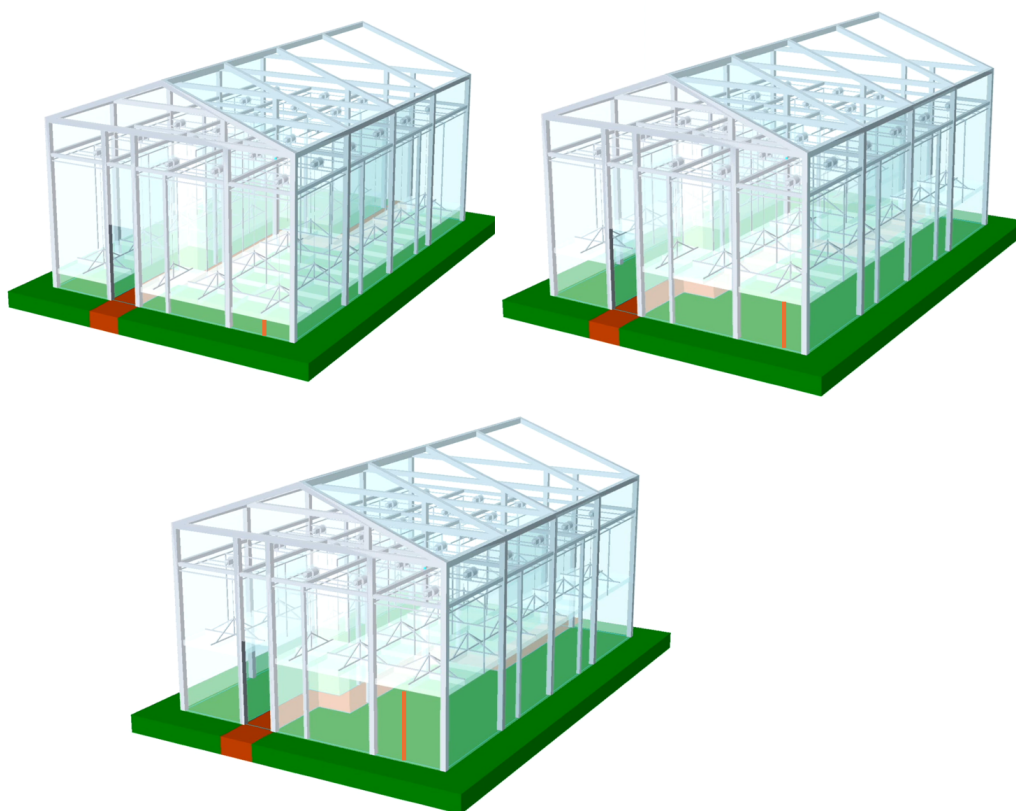


Figura 5.1: Serra adattiva caratterizzata da cielo mobile, mostrata a tempi di crescita delle colture differenti.

L'idea di serra adattiva, come visto, è quella di creare un ambiente che progressivamente si adatta alla crescita della pianta. Il concetto di adattività può essere applicato non solo alle serre verticali ma anche a quelle tradizionali o "serre piane". In particolare, La differenza strutturale con una serra tradizionale è la presenza di un telaio a cui è

ancorato un tetto mobile al di sotto del quale vengono posizionate le colture. Questo, in base all'output di un sistema di rilevazione (sensori o telecamere integrate al cielo mobile) che misura la crescita delle piante, è in grado di traslare verticalmente in modo automatizzato. Tale soluzione consente di ridurre significativamente la superficie disperdente, poiché l'altezza del volume da condizionare diminuisce di un ordine di grandezza (una serra tradizionale presenta altezze al colmo di 5 m, la serra adattiva avrà il cielo al più posizionato a 0.5 m, a seconda della coltura selezionata). Tra il cielo mobile e la coltura deve essere previsto un certo spazio per consentire una uniforme distribuzione dell'aria: il requisito brevettuale è infatti che sia lo stesso cielo mobile a prevedere la distribuzione dell'aria condizionata. Gli unici studi presenti sul principio adattivo riguardano la sua applicazione a vertical farm, che a differenza di una serra tradizionale presenta uno sviluppo in verticale. In particolare, Bagnerini et al. [24] hanno dimostrato che in una vertical farming adattiva la movimentazione dei ripiani garantisce una ottimizzazione del volume del singolo rak, con un incremento della produzione dell'86%. Questo studio mira quindi a evidenziare vantaggi e svantaggi del sistema adattivo applicato a serre orizzontali, mediante simulazioni e modelli energetici che verranno validati in una fase successiva.

## 5.1 Modello EP: Geometria, materiali e coltura

Il seguente studio mira ad una prima analisi dei fabbisogni energetici di una serra adattiva rispetto a una serra tradizionale. Le due serre sono state modellate e simulate in ambiente EnergyPlus, software di analisi dinamica solitamente utilizzato per edifici o impianti HVAC. La serra tradizionale viene modellata come un'unica zona termica che interagisce con l'ambiente esterno e il suolo; viceversa, nella serra adattiva, vengono create due zone termiche, quella inferiore, effettivamente controllata dal punto di vista termoigrometrico, e quella superiore non condizionata. Il tipo di coltura scelto per la simulazione è la lattuga. Considerando una altezza massima della pianta di circa 30-35 cm e un gioco tra cielo mobile e canopia di circa 15 cm, il cielo mobile, nella prima simulazione, viene posto a 50 cm dal suolo. Simulazioni a più altezze consentiranno di simulare il movimento del cielo mobile contemporaneamente alla crescita della coltura. Le due serre sono state realizzate usando l'interfaccia grafica SketchUp [61] e sono presentate in Fig. 5.2.

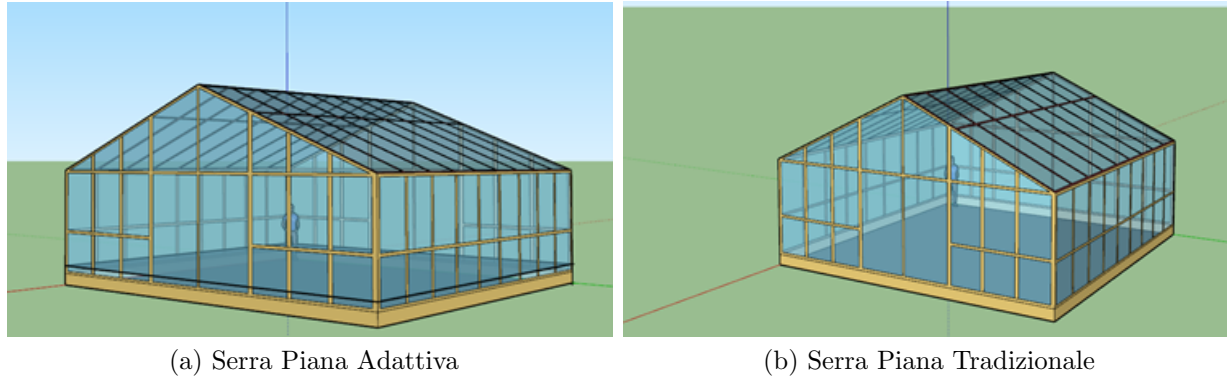


Figura 5.2: Sketch delle due serre a confronto.

Le serre presentano una superficie in pianta di  $96 \text{ m}^2$  ( $9.6 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ), un'altezza di colmo di  $5 \text{ m}$  e alla gronda di  $3 \text{ m}$ . La località scelta per l'installazione delle due serre è Genova. L'orientamento scelto è E-W, poiché, durante la stagione invernale, è l'orientamento che consente di ridurre i fabbisogni energetici.

Tabella 5.1: Specifiche geometriche della serra piana adattiva

| Parametro                                                      | Valore | Unità di misura |
|----------------------------------------------------------------|--------|-----------------|
| Larghezza                                                      | 9,60   | [m]             |
| Lunghezza                                                      | 10,00  | [m]             |
| Altezza di gronda                                              | 3,00   | [m]             |
| Altezza di colmo                                               | 5,00   | [m]             |
| Altezza cielo adattivo<br>(variabile in funzione della pianta) | 0,50   | [m]             |

Ambedue le serre presentano una struttura di supporto realizzata in acciaio, ancorata in una struttura di calcestruzzo armato di  $30 \text{ cm}$ . L'intelaiatura è realizzata in alluminio. Le finestre laterali e quelle al colmo sono apribili, di dimensioni rispettivamente  $1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$  e  $1 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$ . Il cielo mobile, che, come detto porta l'aria condizionata, è costituito da due strati di Mylar ( $50 \mu\text{m}$ ) separati da un gap d'aria di  $10 \text{ cm}$ . A questi spessori, il comportamento ottico del Mylar è assimilabile a quello del vetro [62] e la sua conducibilità termica è di  $0.15 \text{ W/mK}$ . In Tab. 5.3 sono riportate le caratteristiche di tutti gli altri materiali inseriti nel modello.

L'obiettivo di questo primo caso studio è quello di confrontare i fabbisogni energetici. Il set point scelto è di  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  con un valore di umidità non superiore al  $65\%$ , al fine di evitare la proliferazione di funghi e batteri. Il confronto avviene sulla base dell'output Ideal Loads, sensibili e latenti, che in Energy Plus rappresentano i carichi da fornire

Tabella 5.2: Localizzazione geografica simulazione

| Parametro   | Valore     |
|-------------|------------|
| Città       | Genova     |
| Latitudine  | 44,42 °N   |
| Longitudine | 8,85 °E    |
| Altitudine  | 3 m s.l.m. |

Tabella 5.3: Proprietà termofisiche e ottiche dei materiali utilizzati nella modellazione della serra.

| Proprietà                    | Vetro | Acciaio | Alluminio | Calcestruzzo | Suolo |
|------------------------------|-------|---------|-----------|--------------|-------|
| Conducibilità [W/mK]         | 0,9   | 50      | 237       | 0,9          | 0,35  |
| Spessore [m]                 | 0,004 | 0,2     | 0,17      | 0,3          | 0,1   |
| Calore specifico [J/kgK]     | –     | 500     | 928       | 880          | 600   |
| Coeff. trasmissione visibile | 0,83  | –       | –         | –            | –     |
| Coeff. riflessione visibile  | 0,11  | –       | –         | –            | –     |
| Coeff. assorbimento solare   | –     | –       | –         | –            | 0,7   |

o da smaltire per chiudere i bilanci di energia e di massa. Questo componente può essere pensato come un'unità ideale che miscela l'aria nella condizione di scarico della zona con la quantità specificata di aria esterna e quindi aggiunge o rimuove calore e umidità con un'efficienza del 100% per produrre un flusso d'aria di mandata alle condizioni specificate. La simulazione viene eseguita per tutte le 8760 ore dell'anno, e verranno illustrati i risultati per i mesi di dicembre e gennaio (stagione invernale), aprile (stagione intermedia) e agosto (stagione estiva), per valutare le potenzialità del sistema adattivo in diverse condizioni climatiche.

## 5.2 Modello di Evapotraspirazione Serre Piane: Carichi termici e Tecniche passive

Oltre al carico di dispersione attraverso l'involucro, altri carichi termici sono stati inseriti nel modello. In particolare, è stato previsto un minimo ricambio orario legato alle infiltrazioni, settato a 0.15 n/h per le ore notturne e a 0.25 n/h per le ore diurne. Una ulteriore ventilazione naturale è stata introdotta per il modello della serra tradizionale poiché durante le giornate particolarmente soleggiate, per il consueto effetto serra, la temperatura può superare i 24 °C. Per tale motivo, nel modello di serra tradizionale è stata integrata la funzione *AddWindandStackOpenArea* che consente di simulare la convezione naturale per apertura di finestre laterali e al colmo. Il

set point inserito prevede l'apertura delle finestre per temperature interne pari a 26 °C. Per la serra adattiva, si prevede l'utilizzo di un impianto di condizionamento ad aria. Nel presente caso studio si prevede di stimare la portata di aria esterna in ventilazione meccanica nella serra adattiva (mediante la funzione Economizer) per capire se eventualmente sia vantaggioso energeticamente utilizzare questa tecnica passiva per controllare la temperatura interna, mantenendola sotto i 27 °C. Per i mesi estivi, è prevista la presenza di telini ombreggianti: la riduzione del carico di irraggiamento solare consente di ridurre notevolmente i carichi di raffrescamento. Le proprietà dei telini sono riportate in Tab. 5.4.

Tabella 5.4: Proprietà termofisiche e ottiche del telo ombreggiante (Shade).

| Parameter            | Value | Unit   |
|----------------------|-------|--------|
| Spessore             | 0,001 | [m]    |
| Distanza ombra vetro | 0,05  | [m]    |
| Conducibilità        | 0,1   | [W/mK] |
| Trasmittanza solare  | 0,5   | [-]    |
| Riflettanza solare   | 0,4   | [-]    |

Infine, una grande attenzione è stata posta sul calcolo del carico di evapotraspirazione: poiché tale parametro dipende dalla radiazione solare in ingresso nella serra, la sua descrizione avverrà nei paragrafi successivi.

### 5.2.1 Modello EP: Analisi radiazione solare

Prima di procedere con la simulazione dei carichi energetici, sono state effettuate diverse considerazioni per valutare la schermatura alla radiazione solare causata dal cielo mobile. Questo perché, in accordo con Gent [63] il Net Daily Light Integral (NDLI) impatta sulla corretta crescita della coltura. L'NDLI è definibile come la sommatoria dei PAR (photosynthetically active radiation) orari e, in accordo con [64], la frazione di PAR è il 50% della radiazione solare  $R_s$  e 1 MJ di PAR corrisponde a 4.6 mol:

$$NDLI = \sum_{i=1}^{24} R_{s_i} \cdot 3600 \cdot 0.5 \cdot \frac{4.6}{10^6} \quad (5.1)$$

Dove  $i$  rappresentano le ore giornaliere. Dunque, è importante stimare tale parametro per una serra adattiva e tradizionale, perché è fondamentale confrontare i fabbisogni energetici a parità di crescita della lattuga (e, dunque, di produzione). Per la valutazione del termine  $R_s$  un'analisi di primo tentativo è stata effettuata sfruttando

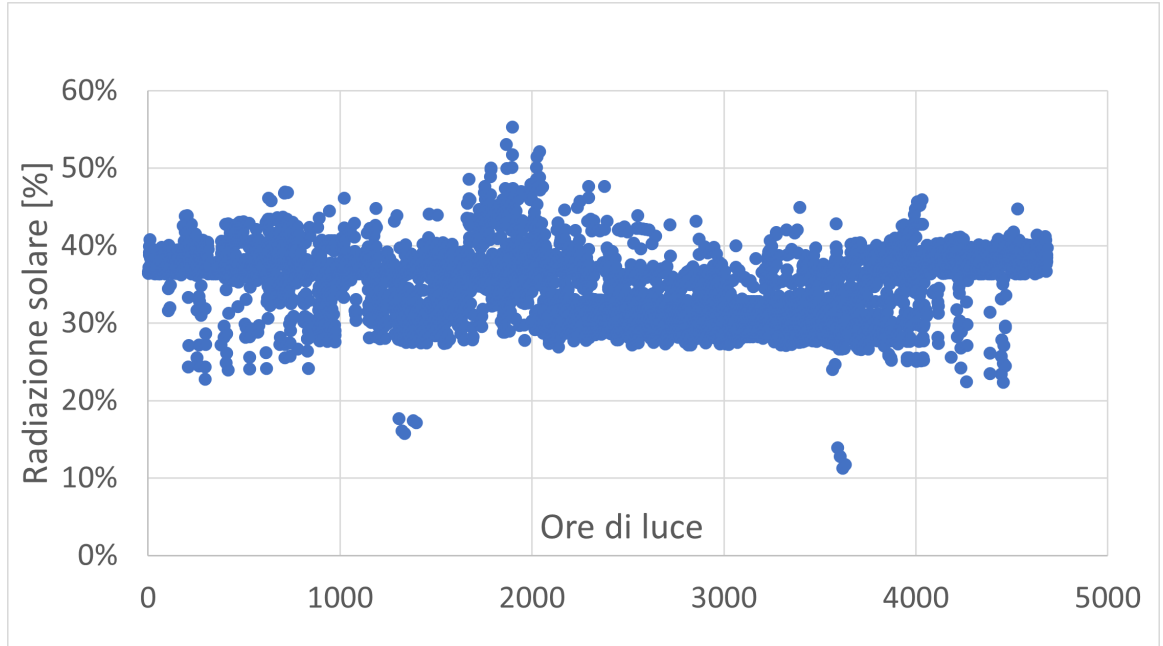


Figura 5.3: Distribuzione percentuale di radiazione esterna che giunge al suolo di una serra tradizionale

l'output Surface Inside Face Solar Radiation Heat Gain Rate per Area [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Tale output rappresenta il flusso trasferito dalla radiazione solare sulla superficie interna o, meglio, la radiazione solare che entrando nella zona di interesse attraverso una finestra viene assorbita dalla superficie in esame (in questo caso, il suolo). La presenza del cielo mobile riduce la radiazione solare in ingresso (rispetto al dato di radiazione solare su superficie orizzontale presente nel file meteo per la località prescelta) maggiormente che per una serra tradizionale, come visibile dalle figure 5.3 e 5.4 che riportano in percentuale il rapporto tra l'energia effettivamente incedente al suolo dentro la serra e l'energia solare incidente su superficie orizzontale esterna.

Sulla base di queste considerazioni è possibile procedere con il calcolo dell'NDLI. In Fig. 5.5 è ad esempio mostrato l'andamento per il mese di gennaio e dimostra come, in assenza di integrazione di luce artificiale, la serra adattiva presenti un deficit in termini di PAR. Dunque, per garantire la stessa produzione (poiché i set point termoigrometrici sono gli stessi) viene stimata la potenza elettrica dei LED da integrare nelle ore notturne per ottenere un pareggio giornaliero dell'NDLI. I PAR necessari al pareggio del NDLI sono definibili come:

$$PAR = (NDLI_{rad} - NDLI_{adaptive}) \cdot \frac{10^6}{ore_{notturne} \cdot 3600 \cdot 4.6} \quad (5.2)$$

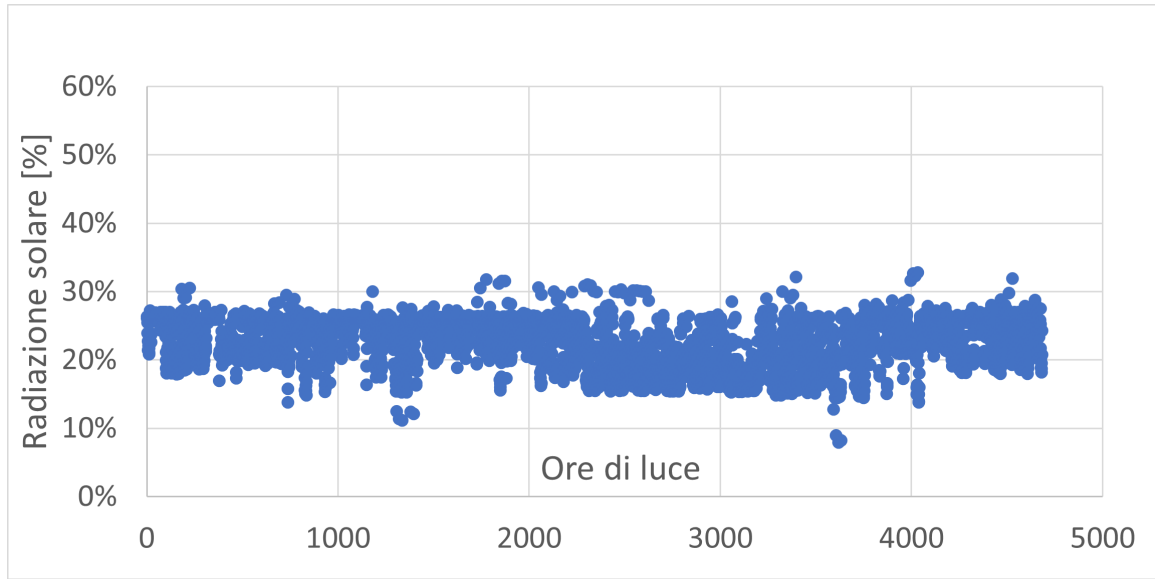


Figura 5.4: Distribuzione percentuale di radiazione esterna che giunge al suolo di una serra adattiva

E supponendo una efficienza  $\eta$  del sistema di illuminazione pari a 0.52, l'energia elettrica complessivamente consumata dai LED:

$$E_{\text{dissipata,giornaliera}} = \frac{PAR}{\eta} \cdot 3600 \cdot \text{ore}_{\text{notturne}} \quad (5.3)$$

I risultati dei consumi di energia elettrica mensili e di potenza elettrica media sono riportati in Tab. 5.5: I risultati mostrano come l'aumento della integrazione artificiale

Tabella 5.5: Consumo energetico mensile specifico e potenza elettrica

| Mese     | $kWh_e/\text{mese} \cdot m^2$ | $W/m^2$ |
|----------|-------------------------------|---------|
| Dicembre | 9                             | 22      |
| Gennaio  | 11                            | 23      |
| Aprile   | 16                            | 40      |
| Agosto   | 25                            | 80      |

segua quello della radiazione solare esterna su superficie orizzontale (da dicembre a agosto aumenta l'irraggiamento solare). Nel modello Energy plus della serra adattiva, è quindi opportuno inserire un internal gain legato alla illuminazione.

### 5.2.2 Modello EP: Analisi evapotraspirazione

Questo tema è fondamentale soprattutto nella serra adattiva, dove i ridotti volumi d'aria comportano difficoltà nella gestione dell'umidità. Alcune modifiche sono state

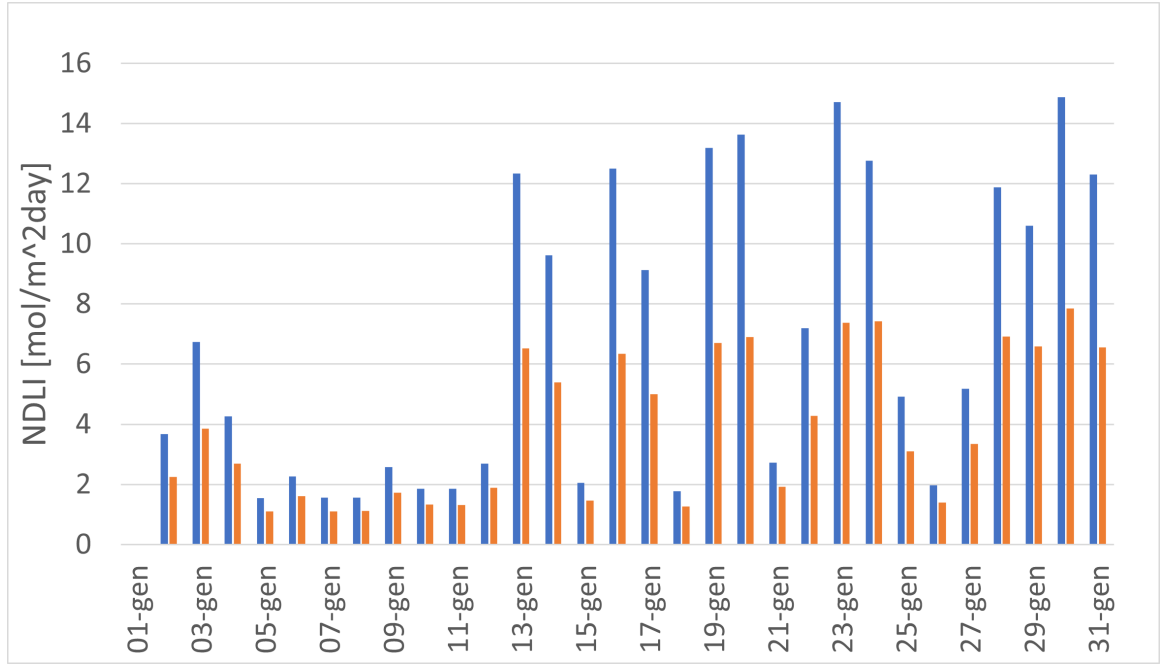


Figura 5.5: NDLI in assenza di LED integrativi

apportate al modello di Penman-Montheit in maniera tale da renderlo applicabile a coltivazioni in serra. In particolare, sono state confrontate diverse relazioni per il calcolo della resistenza aerodinamica e della resistenza della canopia. L'equazione originale di Penman-Monteith consente una stima della portata di evapotraspirazione sulla base dei dati meteorologici e caratteristiche della coltivazione. L'equazione generale è così definita:

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (Rn - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{e_s - e_a}{r_a} \cdot 3600}{\Delta + Y \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (5.4)$$

Dove i singoli termini rappresentano:

- $\lambda$ : calore latente di vaporizzazione [MJ/kg];
- ET: portata di evapotraspirazione [mm/h];
- $\Delta$ : slope vapour pressure curve [kPa/°C];
- Rn: radiazione netta sulla canopia [MJ/m²h];
- G: flusso di calore dal suolo [MJ/m²h];
- $\rho_a$  e  $c_{p_a}$ : densità [kg/m³] e calore specifico dell'aria [MJ/kgK];



- $e_s$ : pressione di vapore a saturazione;
- $e_a$ : pressione di vapore attuale;
- $r_a$ : resistenza aerodinamica [s/m];
- $r_c$ : resistenza della canopia [s/m];
- $Y$ : costante psicometrica [kPa/°C].

Nel modello di Penman originale le resistenze aerodinamiche e della canopia sono così definite [43]:

$$r_c = 2 \cdot \frac{r_s}{LAI} \quad (5.5)$$

$$r_a = \ln \left( \frac{z_m - d}{z_{om}} \right) \ln \left( \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right) \cdot \frac{1}{k^2 \cdot u_z} \quad (5.6)$$

Dove:

- $r_s$  è la resistenza dello stoma [s/m];
- $LAI$ , leaf area index, rapporto tra area fogliare e l'area in pianta della coltivazione;
- $z_m$ : altezza dello strumento di misurazione del vento [m];
- $z_h$ : altezza dello strumento di misurazione dell'umidità [m];
- $z_{om}$ : roughness length governing momentum transfer [m];
- $z_{oh}$ : roughness length governing transfer of heat and vapour [m];
- $u_z$ : velocità del vento [m/s];
- $k$ : costante di Von Karman, 0.41.

Il difetto del modello di Penman-Montheit è legato al fatto che è definito per superfici all'aperto, dove le velocità dell'aria sono maggiori rispetto a quelle riscontrabili in una serra (soprattutto nella stagione invernale, in assenza di ventilazione). Inoltre, il modello di Penman tradizionale tiene poco conto delle variazioni del LAI e dunque dei diversi stadi della cultura. Nel caso di coltivazioni in serra, Rangjian Qiu et al. propongono che la resistenza aerodinamica si ottenga dal coefficiente di scambio termico convettivo per singola foglia [65]:

$$r_a = p_a \cdot \frac{c p_a}{h \cdot LAI} \quad (5.7)$$

Il coefficiente di scambio termico  $h$  viene calcolato in base alle condizioni di scambio termico:

- In condizioni di convezione naturale, in accordo con McAdams, 1954 [66], valida per  $Gr/Re^2 > 10$ :

$$h = 0,37 \cdot \left(\frac{k}{d}\right) \cdot Gr_r^{0.25} \quad (5.8)$$

- Nel caso di convezione forzata, in accordo con Grober e Erik [66], valida per  $Gr/Re^2 < 0.1$ :

$$h = 0.6 \cdot \left(\frac{k}{d}\right) \cdot Re^{0.5} \quad (5.9)$$

- Nel caso di mixed convection [67], valida per  $0.1 < Gr/Re^2 < 10$ :

$$h = 0.37 \cdot \left(\frac{k}{d}\right) \cdot (Gr_r + 6.92 \cdot Re^2)^{0.25} \quad (5.10)$$

Dove  $d$  è la dimensione caratteristica della foglia della coltura in esame,  $k$  è la conducibilità termica,  $Gr$  e  $Re$  sono i numeri di Grashof e Reynolds.

Viceversa, la resistenza  $r_c$ , o resistenza della canopia, è ricavabile dalla resistenza dello stoma  $r_s$  [43]

$$r_c = \frac{r_s}{LAI_{eff}} \quad (5.11)$$

Il  $LAI_{eff}$  è pari al  $LAI$  se  $LAI < 2$ , 2 se  $2 < LAI < 4$ ,  $LAI/2$  se  $LAI > 4$ . Pollett e Blayert [67] hanno dimostrato che la resistenza dello stoma (con riferimento alle coltivazioni di lattuga) è funzione della radiazione solare, della differenza parziale di vapore ( $e_s - e_a$  nell'equazione di Penman) e della temperatura dell'aria:

$$r_s = 164 \cdot \frac{31,029 + R_s}{6,740 + R_s} \cdot (1 + 0,011 \cdot (e_s - e_a - 3)^2 \cdot 1 + 0,016 \cdot (T_a - 16.4)^2) \quad (5.12)$$

Dove  $R_s$  è la radiazione solare in  $W/m^2$  al suolo all'interno della serra (definita nel paragrafo precedente).

I risultati, come visibile in Fi. 5.6 (relativi alla serra tradizionale), dimostrano che la portata massica di acqua associata non è costante ma segue la variabile attività di evapotraspirazione della vegetazione, come descritto dal modello Penman-Monteith. In particolare, l'evapotraspirazione è fortemente influenzata dall'irradiazione solare e presenta un andamento periodico durante il ciclo giorno-notte. I valori orari di evapotraspirazione sono stati convertiti in profili giornalieri a tre gradini (un profilo tipo per ogni mese dell'anno) per rendere più agevole il loro inserimento in un'opportuna Schedule del modello in EnergyPlus. In particolare, dopo aver calcolato la portata di

Tabella 5.6: Parametri utilizzati nel modello termo-energetico

| Var.          | Unità                 | Formula                                                                                      | Valore             |
|---------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $T_a$         | [°C]                  | /                                                                                            | 24                 |
| $i_a$         | [%]                   | /                                                                                            | 65                 |
| $\rho_a$      | [kg/m <sup>3</sup> ]  | Diagramma psicrometrico                                                                      | /                  |
| $c_{pa}$      | [MJ/kgK]              | /                                                                                            | 0.001013           |
| $\Delta$      | [kPa/°C]              | $\left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237}\right)\right] \frac{4098}{(T_a + 237)^2}$ | [43]               |
| $e_a$         | [kPa]                 | $0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237}\right)$                                 | [43]               |
| $e_s$         | [kPa]                 | $0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237}\right)$                                         | [43]               |
| $r_a$         | [s/m]                 | $\frac{\rho_a \cdot c_{pa}}{h \cdot LAI}$                                                    | [65]               |
| $u_z$         | [m/s]                 | /                                                                                            | 0.05 / 0.3         |
| $Re$          | [-]                   | $\frac{u_z \cdot d}{\nu}$                                                                    | [68]               |
| $Gr$          | [-]                   | $\frac{g\beta d^3  T_f - T_a }{\nu^2}$                                                       | [68]               |
| $d$           | [m]                   | $d = \frac{2}{\frac{1}{L} + \frac{1}{W}}$                                                    | [69]               |
| $R_s$         | [MJ/m <sup>2</sup> h] | /                                                                                            | Sim.preliminare EP |
| $T_f$         | [°C]                  | Daily: $T_a + 1.67I_s - 0.25 \frac{VPD}{Y}$ Night: $T_a - 0.1 \frac{VPD}{Y}$                 | [70]               |
| $VPD$         | [kPa]                 | $e_s - e_a$                                                                                  | /                  |
| $Y$           | [kPa/°C]              | $\frac{c_{pa} \cdot \rho_a}{\varepsilon \cdot \lambda}$                                      | [43]               |
| $\varepsilon$ | [-]                   | /                                                                                            | 0.622              |
| $\lambda$     | [MJ/kg]               | $2.5101 - 0.0023T_a$                                                                         | /                  |
| $R_n$         | [MJ/m <sup>2</sup> h] | $R_s (1 - \exp(-\eta \cdot LAI))$                                                            | [65]               |
| $G$           | [MJ/m <sup>2</sup> h] | /                                                                                            | Trascurabile       |

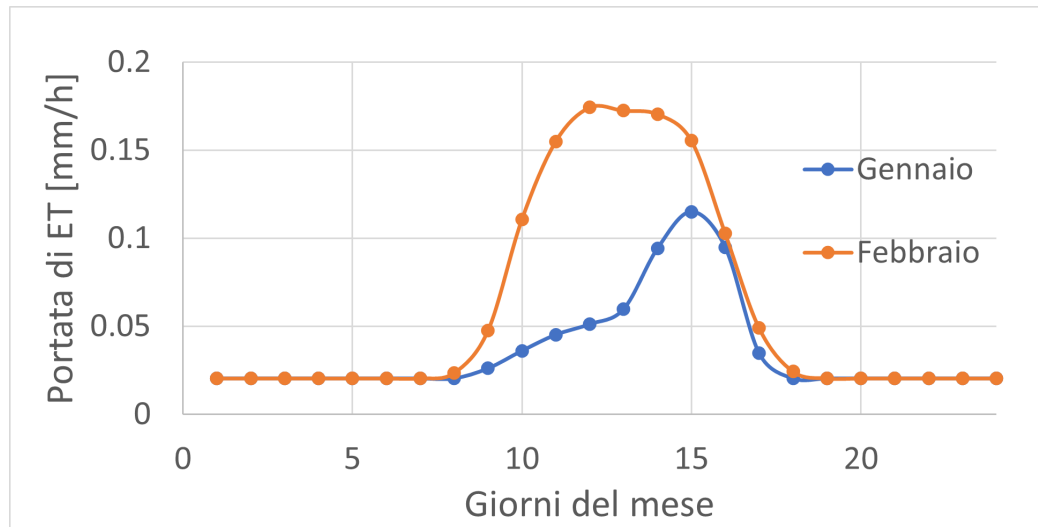


Figura 5.6: Portata di evapotraspirazione oraria per il primo giorno del mese [mm/h]

evapotraspirazione per tutti i mesi dell'anno, i valori orari di evapotraspirazione sono stati convertiti in profili giornalieri a tre gradini. Per ogni profilo giornaliero, il primo gradino rappresenta il valore minimo di evapotraspirazione durante i periodi notturni (assenza di irraggiamento) ed è calcolato come valore medio mensile dei valori minimi giornalieri di evapotraspirazione tra tutti i giorni del mese preso in considerazione. Il gradino più alto rappresenta il valore massimo di evapotraspirazione corrispondente alle ore di massima irradiazione solare ed è calcolato come valore medio mensile dei valori massimi giornalieri di evapotraspirazione tra tutti i giorni del mese in esame. Il gradino intermedio caratterizza le rimanenti ore del giorno (a basse radiazioni) ed è calcolato come media tra i due valori precedenti. Come visibile in Fig. 5.7, i profili a gradini, non mostrano differenze significative utilizzando le due diverse espressioni della resistenza della canopia, di Pollett o di Stanghellini.

L'evapotraspirazione è stata inserita con l'oggetto Other Equipment (con frazione latente 1) modellando, con una schedula di tipo fractional, la portata di evapotraspirazione media mensile per ora. In totale sono state inserite 48 diverse schedule per tenere conto dell'impatto della crescita della pianta ( $LAI$ ) sull'attività evapotraspirante. Per concludere l'analisi dell'evapotraspirazione, sono state effettuate diverse simulazioni per valutare l'impatto dei singoli parametri. Per la resistenza aerodinamica, piccole variazioni e scostamenti si riscontrano soprattutto nelle ore notturne, in accordo con [33], che ha dimostrato che la resistenza aerodinamica impatta debolmente sulla portata evapotraspirante. Sulla resistenza aerodinamica influisce anche il parametro  $d$ , cioè la dimensione caratteristica della foglia. Si assumono  $L=12.27\text{cm}$  e  $W=8.47\text{cm}$  si

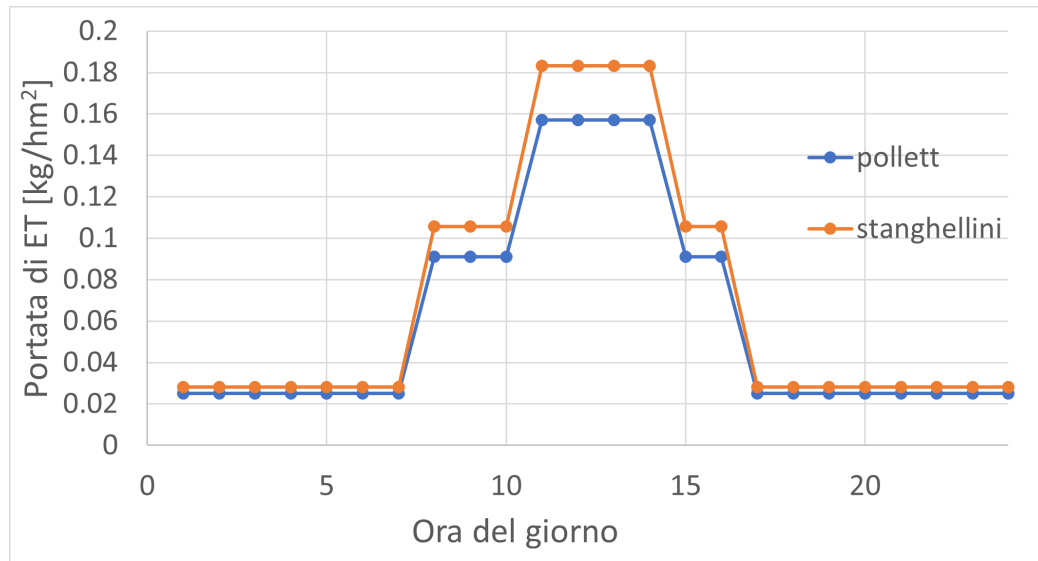


Figura 5.7: Portata media giornaliera per i mesi di Gennaio ( $LAI$  3)

fa riferimento ai seguenti valori [69]. Dall'analisi, è risultato che i termini che maggiormente influenzano la portata di evapotraspirazione sono il  $LAI$  e la radiazione solare. Circa l'effetto del  $LAI$ , dall'andamento medio mensile quello che si evince è una grossa differenza per bassi valori del  $LAI$  (da 0.25 a 2), per poi avere un avvicinamento delle curve a  $LAI$  3 e 4 (Fig. 5.9). Osservando la curva di crescita della lattuga [52], per l'inserimento delle schedule in energy plus, è stato quindi necessario inserire almeno 4 diversi andamenti a gradini a mese. La curva è stata ricavata sperimentalmente per valori di temperatura e umidità interna rispettivamente di 24 °C e 80%, con valori di daily light integral tra 3 e 10 mol/m<sup>2</sup>day in serra.

Tabella 5.7: Leaf Area Index ( $LAI$ ) nel tempo

| Giorno    | $LAI$ |
|-----------|-------|
| 1 – 5     | 0.25  |
| 5 – 8     | 1     |
| 9 – 13    | 2     |
| 14 in poi | 3.5   |

### 5.3 Risultati modello: confronto evapotraspirazione

Calcolata la radiazione solare al suolo, l'illuminazione notturna (per serra adattiva) e scelto il valore del  $LAI$ , è possibile procedere al calcolo dell'evapotraspirazione per

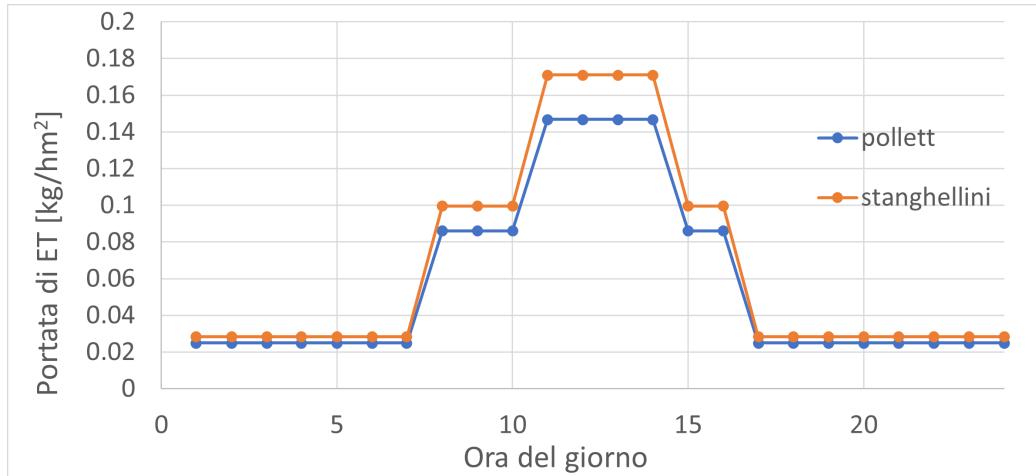


Figura 5.8: Portata media giornaliera per i mesi di Dicembre ( $LAI$  3)

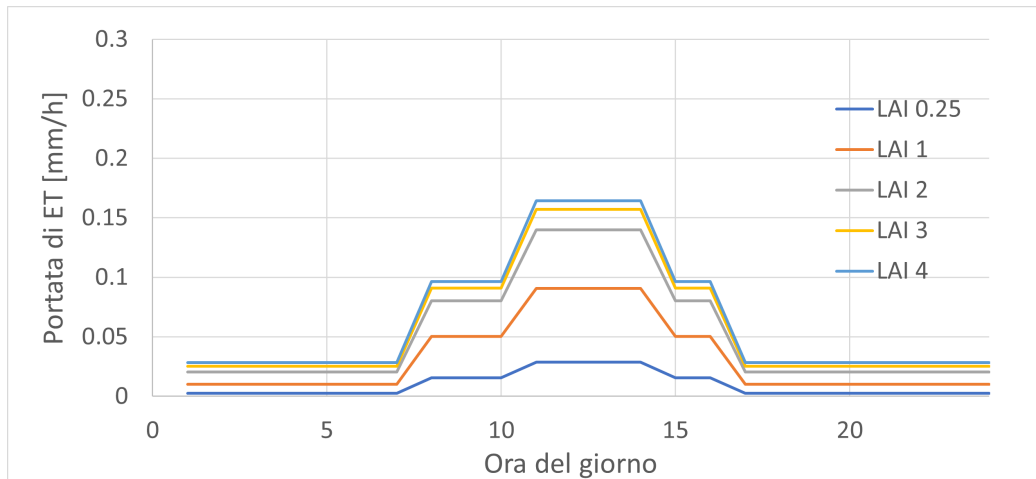


Figura 5.9: Effetto del  $LAI$  (serra tradizionale)

le 8760 ore dell'anno. In figura 5.10 viene illustrato il confronto per serra adattiva e tradizionale, con riferimento ai mesi di gennaio. Si specifica che il gradino notturno della serra adattiva viene modificato introducendo l'effetto dell'illuminazione integrativa dei LED definita in tab.6. I risultati dimostrano come, in assenza di luce artificiale, l'attività evapotraspirante sia più bassa nella serra adattiva, per effetto della schermatura del cielo mobile, tranne che per le ore serali (a causa di una maggiore velocità del vento, ipotizzata pari a 0.3 m/s nella serra adattiva). L'integrazione artificiale modifica l'attività di evapotraspirazione notturna, compensando gli effetti della schermatura del cielo mobile nelle ore diurne. È fondamentale, inoltre, osservare figura 5.11, che mostra i mm/h emessi su m<sup>3</sup> di volume condizionato. I risultati mostrano come questo parametro sia di un ordine di grandezza più grande nella serra adattiva rispetto alla tradizionale. La minore massa d'aria presente nella serra adattiva

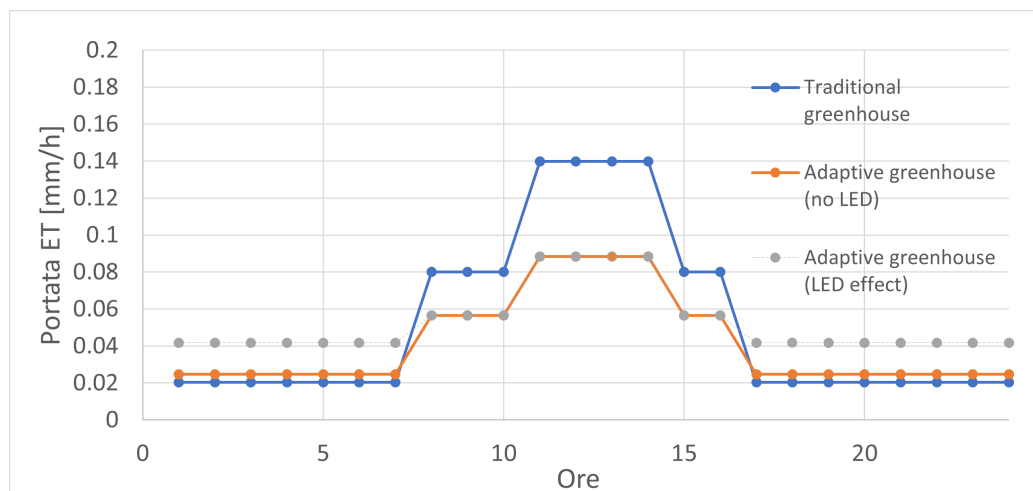


Figura 5.10: Confronto attività evapotraspirante ( $LAI$  2) nel mese di gennaio

comporta quindi maggiore difficoltà nella gestione del microclima e anche piccole variazioni possono diventare significative.

## 5.4 Risultati modello: effetto tecniche passive e andamenti orari

Sulla base dai settaggi precedentemente definiti, è stata effettuata una prima simulazione per la valutazione dei carichi, con l'oggetto Ideal Loads presente in EnergyPlus. Riepilogando, nella serra tradizionale e adattiva viene impostato un SetPoint di riscaldamento a 24 °C; viceversa, il carico per raffrescamento è minimizzato mediante la funzione Economizer nella serra adattiva e mediante la ventilazione naturale con l'apertura delle finestre per la tradizionale. Il set point di raffrescamento è posto a 27°C. Inoltre, si specifica che l'apertura delle finestre è prevista anche nel modello di serra adattiva al fine di evitare il forte incremento delle temperature dell'involucro superiore non condizionato. Il settaggio della funzione economizer scelto è DifferentialEnthalpy cioè la ventilazione parte in presenza di carichi di raffrescamento quando l'aria esterna presenta un contenuto entalpico più basso dell'aria interna. Questo perché un controllo di tipo DifferentialDryBulb, che a sua volta verifica solo la differenza di temperatura tra interno ed esterno, potrebbe causare, nella stagione estiva, un ingresso d'aria ad alto contenuto igrometrico con un forte peggioramento del carico latente. La funzione DifferentialEnthalpy consente una adeguata ventilazione per il controllo di temperatura e umidità minimizzando il carico totale e non solo il sensibile. La Tab. 5.8 offre un riepilogo dei diversi settaggi.

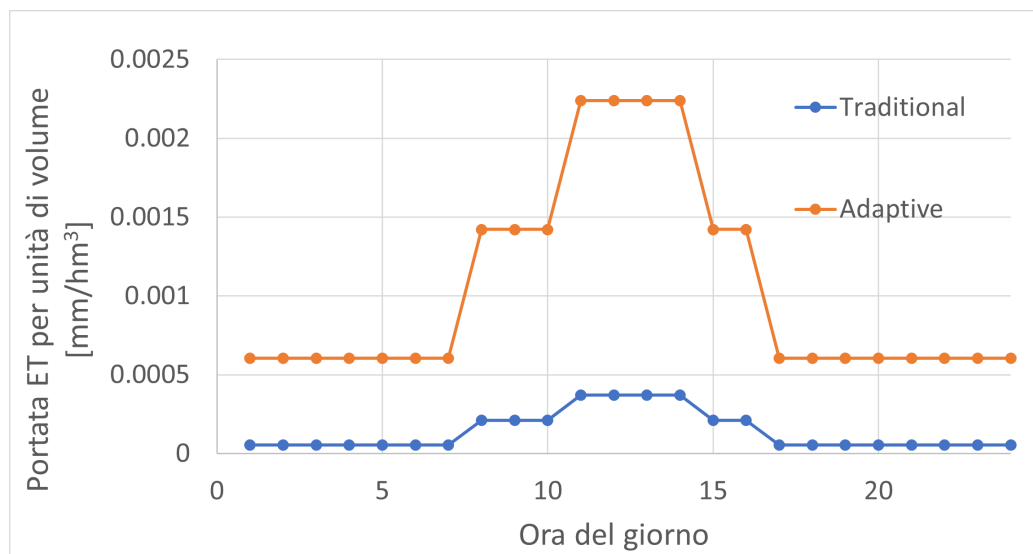


Figura 5.11: Confronto attività evapotraspirante su  $\text{m}^3$  di volume condizionato in serra piana e adattiva ( $LAI$  2) nel mese di gennaio

Tabella 5.8: Confronto set point serra adattiva e serra tradizionale

| Serra        | $T_{\min}$ [°C] | $T_{\max}$ [°C] | U.R. max [%] | Set point vent. [°C] |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------------|
| Adattiva     | 24              | 27              | 65           | 26                   |
| Tradizionale | 24              | 27              | 65           | 26                   |

Per la serra tradizionale la ventilazione è naturale con l'uso di finestre, per la serra adattiva si usa ventilazione meccanica sotto al cielo mobile e naturale per la parte superiore. Entrambe le serre sono equipaggiate con teli ombreggianti, quando si utilizzano i teli il set point interno di temperatura è di 27°C.

Energy plus esegue simulazioni dinamiche e orarie. A titolo di esempio, si riporta l'impatto di ciascuna tecnica definite in Tab. 5.8 tramite i risultati orari. In Fig. 5.12 viene riportato l'effetto della ventilazione meccanica forzata con azzeramento del carico di raffrescamento e riduzione del carico latente (in riferimento al 31 gennaio) nella serra adattiva. La curva blu rappresenta il raffreddamento sensibile con ventilazione forzata nella serra adattiva, in arancione è il carico termico corrispettivo senza ventilazione forzata, la curva grigia mostra il carico latente senza ventilazione e la curva gialla con ventilazione; la curva tratteggiata mostra l'andamento della portata d'aria esterna. Si è calcolato che i telini ombreggianti riducono di circa il 50% la radiazione solare. La Figura 5.13 mostra la riduzione del carico di raffrescamento tramite le tecniche passive (nella serra tradizionale, nella adattiva è analogo) nel mese di agosto.



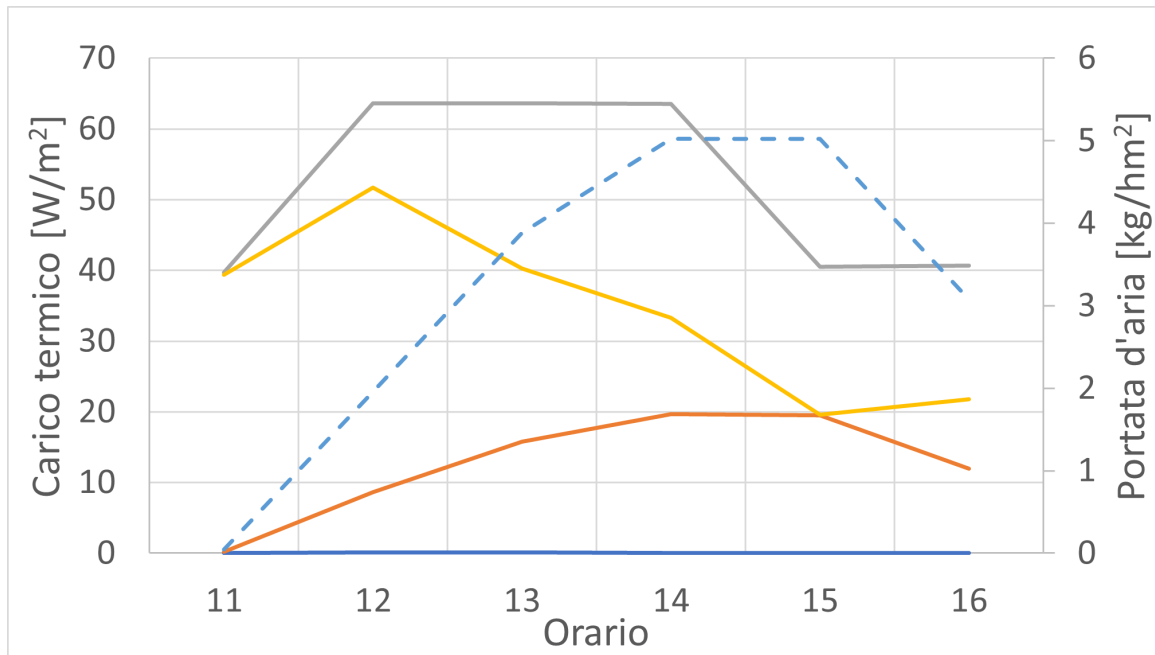


Figura 5.12: Effetto della ventilazione meccanica sui carichi termici

## 5.5 Risultati modello: confronto serra adattiva e serra tradizionale

Come ultima analisi, viene proposto il confronto (giornaliero e mensile) degli Ideal loads sensibili di riscaldamento e raffreddamento e dell'Ideal Loads di raffreddamento latente per la gestione del processo di evapotraspirazione. Partendo dalla stagione invernale (Fig.5.14 dicembre), si evince una ovvia riduzione del carico sensibile nella serra adattiva, dovuta alla riduzione della superficie disperdente. Inoltre, bisogna ricordare che il cielo mobile confina con una zona non condizionata ma a temperatura maggiore rispetto quella esterna. Il carico latente di raffreddamento, viceversa, è più alto nella serra adattiva: essendo in una stagione invernale, quindi in condizioni di riscaldamento, gli unici ricambi orari sono quelli associati alle infiltrazioni. A parità di ricambi, il maggior volume della serra tradizionale comporta una maggiore portata volumetrica esterna di ventilazione e dunque, essendo il contenuto igrometrico esterno minore di quello interno, una maggiore riduzione del carico latente. L'andamento del carico latente è coerente con la curva di crescita della pianta, perché l'incremento del *LAI* comporta un aumento dell'attività evapotraspirante. Le stesse considerazioni sul carico sensibile valgono per il mese di agosto Fig. 5.15. Diversa è la situazione sul carico latente, poiché ad agosto la ventilazione non comporta abbattimenti del carico latente (a causa dell'alto contenuto igrometrico esterno). Su base mensile, si

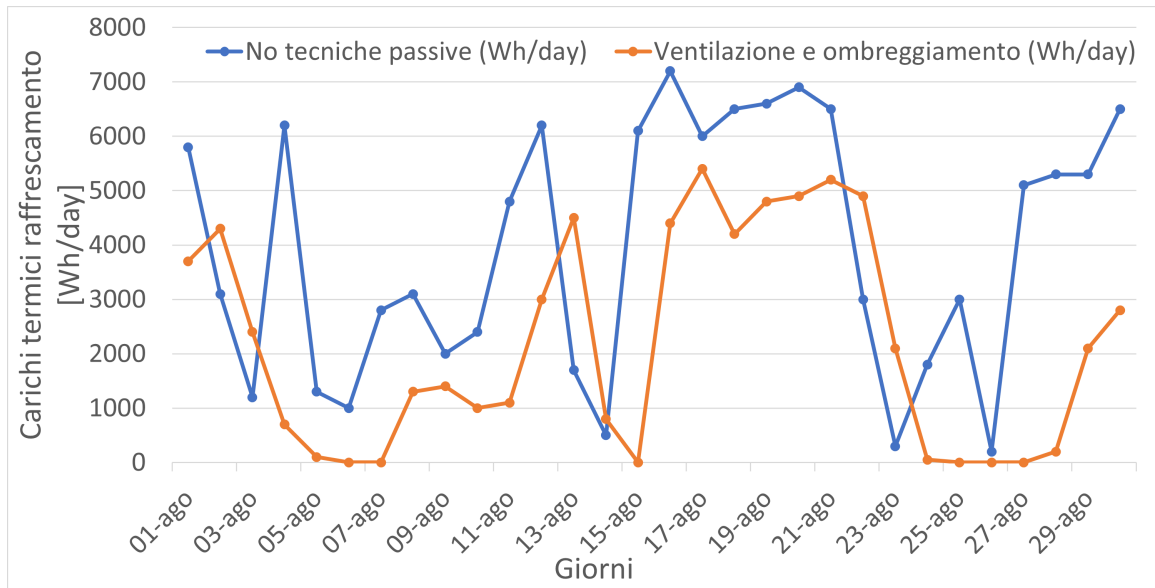


Figura 5.13: Riduzione carichi raffrescamento

ottengono i seguenti valori presentati nelle tabelle 5.9 e 5.10

Tabella 5.9: Riepilogo risultati serra adattiva

|                                              | Dicembre | Gennaio | Aprile | Agosto |
|----------------------------------------------|----------|---------|--------|--------|
| kWh termici sensibili mensili/m <sup>2</sup> | 12       | 11      | 10     | 24     |
| kWh termici latenti mensili/m <sup>2</sup>   | 22       | 24      | 27     | 35     |
| kWh elettrici/m <sup>2</sup>                 | 9        | 11      | 16     | 25     |

Tabella 5.10: Riepilogo risultati serra tradizionale

|                                              | Dicembre | Gennaio | Aprile | Agosto |
|----------------------------------------------|----------|---------|--------|--------|
| kWh termici sensibili mensili/m <sup>2</sup> | 72       | 70      | 32     | 26     |
| kWh termici latenti mensili/m <sup>2</sup>   | 16       | 18      | 24     | 42     |

## 5.6 Risultati modello: conclusioni

Riepilogando, come visibile dai risultati in Tab. 5.9 e 5.10, il sistema adattivo mostra dei vantaggi potenziali solo in stagioni invernali. Durante il mese di agosto, nonostante la riduzione del carico sensibile di raffrescamento derivante dalla movimentazione del cielo mobile si ha la necessità di dover smaltire anche il carico derivante dai LED (80 W/m<sup>2</sup>, Tab. 5.5) ottenendo circa un pareggio in termini di fabbisogno energetico mensile. Viceversa, nella stagione invernale, la presenza dei LED riduce

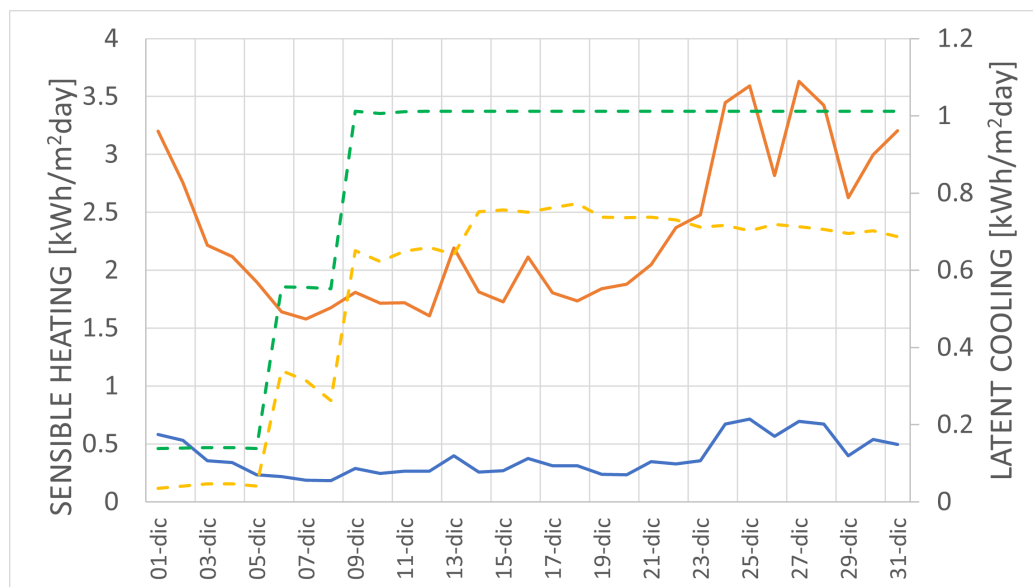


Figura 5.14: Confronto kWh/day m<sup>2</sup> (dicembre), in blu il carico sensibile di riscaldamento della serra adattiva e in verde tratteggiato il carico latente di raffreddamento; in arancione il carico sensibile di riscaldamento della serra tradizionale e in giallo tratteggiato il carico latente di raffreddamento

il fabbisogno energetico poichè il calore dissipato rappresenta un flusso entrante nel vano adattivo. L'effetto dell'illuminazione integrativa è mostrato in Tab. 5.11. È fondamentale ricordare che all'interno di questa simulazione si è scelto di non

Tabella 5.11: Confronto fabbisogno termico sensibile con e senza illuminazione LED

|                                               | Dicembre | Gennaio | Aprile | Agosto |
|-----------------------------------------------|----------|---------|--------|--------|
| kWh termici sensibili/m <sup>2</sup> (LED)    | 12       | 11      | 10     | 24     |
| kWh termici sensibili/m <sup>2</sup> (NO LED) | 20       | 19      | 25     | 10     |

considerare la potenziale movimentazione del cielo mobile. Abbassando, infatti, ulteriormente l'altezza del vano adattivo, non si ottiene una significativa riduzione in termini di fabbisogni sensibili. La movimentazione è utile nel caso di colture ad alto sviluppo e con altezze molto variabili durante il ciclo di crescita, poiché consente di ottimizzare sempre il volume e ottenenere il minimo disperdimento energetico dalla superficie. Inoltre, è importante evidenziare che la serra adattiva massimizza le sue prestazioni nella fase di germinazione (o nel caso di colture a bassa attività evapotraspirante). La figura 5.16, infatti, mostra la differenza percentuale tra i kWh termici/day totali (sensibile+latente) della serra tradizionale ed adattiva, ed evidenzia come i primi giorni (*LAI* 0.25-1) siano quelli di massimo guadagno con una riduzione del fabbisogno totale fra il 50 e l'80 %. Infine, per cercare di quantificare il vantaggio

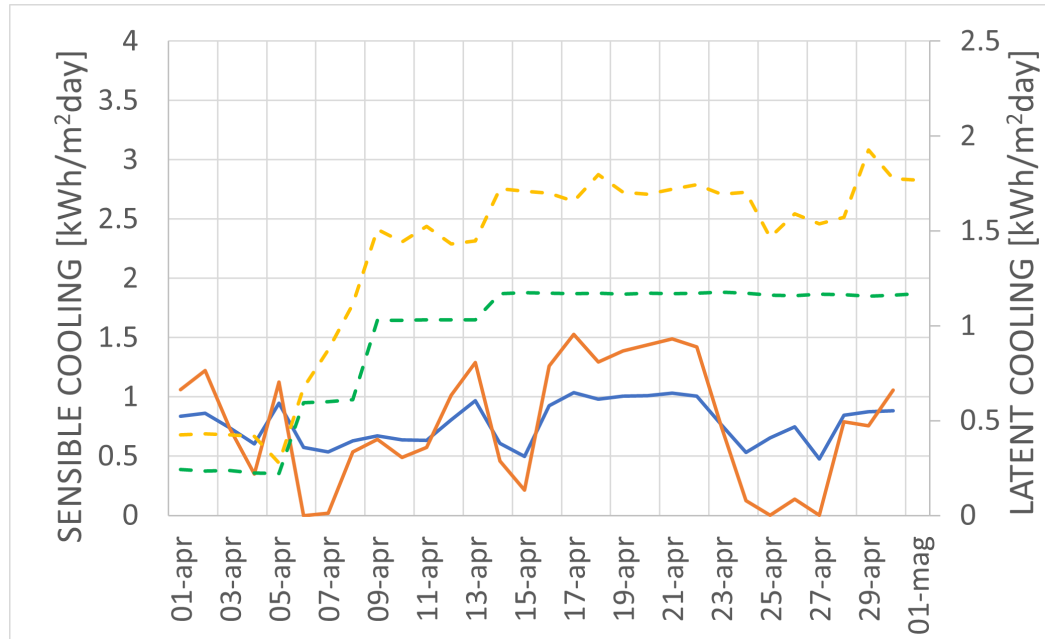


Figura 5.15: Confronto kWh/day m<sup>2</sup> (agosto), in blu il carico sensibile di raffreddamento della serra adattiva e in verde tratteggiato il carico latente di raffreddamento; in arancione il carico sensibile di raffreddamento della serra tradizionale e in giallo tratteggiato il carico latente di raffreddamento

del sistema adattivo nei mesi invernali, si procede con una rapida stima del fabbisogno di ventilazione per lo smaltimento del carico latente, da integrare al flusso sensibile precedentemente definito. Per farlo, si definiscono i contenuti igrometrici medi mensili nella serra e all'esterno (come output mensili di EP). Da un semplice bilancio di massa,

Tabella 5.12: Umidità specifica dell'aria ( $y$ ) in condizioni esterne e in serra

| $y$ [gv/kg <sub>as</sub> ] | Dicembre | Gennaio |
|----------------------------|----------|---------|
| Esterno                    | 4.6      | 4.8     |
| Serra adattiva             | 12.1     | 12.3    |
| Serra tradizionale         | 12       | 12      |

è possibile ottenere una stima della portata d'aria mensile.

$$m_{as} = Q_{lat} \cdot 3.6 \cdot \frac{10^6}{h_v \cdot (y_{int} - y_{ext})} \quad (5.13)$$

E dalla differenza di entalpia interna ed esterno, il flusso di ventilazione. Considerando un rendimento di impianto pari a 0.8 e un rendimento di conversione in energia elettrica pari a 0.5, si ottiene: L'analisi comparativa dei fabbisogni energetici evidenzia il vantaggio competitivo della configurazione adattiva rispetto a quella tradizionale. Il

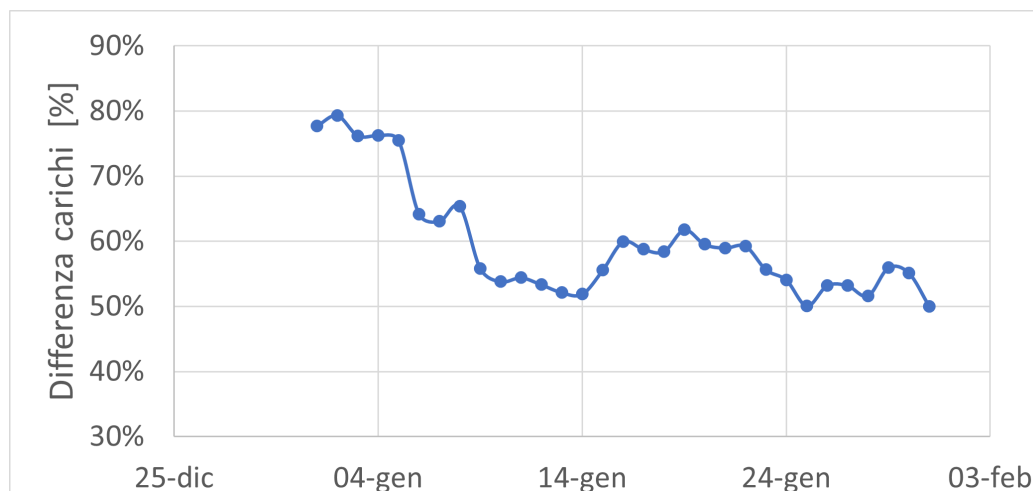


Figura 5.16: Differenza percentuale tra i kWh termici/day totali (sensibile+latente) della serra tradizionale ed adattiva

Tabella 5.13: Consumi mensili per ventilazione specifici

| kWh mensili ventilazione/m <sup>2</sup> | Dicembre | Gennaio |
|-----------------------------------------|----------|---------|
| Serra adattiva                          | 63       | 67      |
| Serra tradizionale                      | 52       | 48      |

confronto energetico tra le due configurazioni evidenzia una sensibile riduzione del fabbisogno di energia primaria nella serra adattiva, con risparmi del 27% a dicembre (da 155 a 112 kWh<sub>prim</sub>/m<sup>2</sup>) e del 20% a gennaio (da 147 a 119 kWh<sub>prim</sub>/m<sup>2</sup>).

Tale efficienza è strettamente correlata alla diversa gestione dei volumi e dei sistemi ausiliari:

- **Gestione della Ventilazione:** Mentre la serra tradizionale si affida esclusivamente alla ventilazione naturale tramite l'apertura delle finestre, la configurazione adattiva adotta un approccio ibrido. L'integrazione della ventilazione meccanica nel volume confinato (sotto il cielo mobile) garantisce un controllo igrometrico ottimale anche a volumi ridotti, mentre la parte superiore della struttura continua a sfruttare la ventilazione naturale.
- **Schermatura Solare:** Entrambi i modelli sono equipaggiati con teli ombreggianti, assicurando una protezione omogenea contro il surriscaldamento estivo e il controllo del DLI (Daily Light Integral).
- **Bilancio Energetico:** Nonostante l'introduzione dei consumi legati alla ventilazione meccanica, il bilancio netto rimane ampiamente favorevole alla serra

Tabella 5.14: Consumi di energia primaria specifici

| kWh primari/m <sup>2</sup> | Dicembre | Gennaio |
|----------------------------|----------|---------|
| Serra adattiva             | 112      | 119     |
| Serra tradizionale         | 155      | 147     |

adattiva. Il drastico abbattimento delle dispersioni termiche notturne compensa ampiamente il dispendio energetico legato alla gestione del carico latente.

In conclusione, la serra adattiva si dimostra una soluzione tecnologica superiore per il contesto climatico analizzato, riuscendo a coniugare il risparmio energetico con una gestione attiva del microclima colturale.

# Capitolo 6

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha fornito la prima valutazione quantitativa sistematica delle prestazioni energetiche e agronomiche dei sistemi di coltivazione adattivi, sia in configurazione verticale (AVF) che piana. La ricerca ha dimostrato che l'integrazione di sistemi meccanici mobili e algoritmi di controllo dinamico rappresenta una soluzione chiave per superare i limiti di intensità energetica dell'agricoltura indoor contemporanea. L'agricoltura verticale è essenziale per ridurre lo spreco di suolo, poiché consente di coltivare alimenti in ambienti urbani utilizzando lo spazio verticale anziché quello orizzontale. Inoltre, l'agricoltura verticale consente la coltivazione di alimenti in spazi ristretti, riducendo il consumo di terreni agricoli e contribuendo a pratiche agricole più sostenibili e meno invasive per l'ambiente. L'agricoltura verticale adattiva (AVF) si basa sull'idea di regolare gradualmente la distanza tra i ripiani per adattarsi alla crescita delle piante. Grazie agli algoritmi di ottimizzazione, dopo una fase di avvio adeguata, il sistema AVF raggiunge la condizione di equilibrio massimizzando la superficie coltivata e ottimizzando il volume a sua disposizione, con un conseguente aumento significativo della produttività a parità di superficie occupata.

E' stato considerato uno scenario di agricoltura verticale su scala industriale comprendente 272 scaffali multilivello, ciascuno contenente 8 ripiani di coltivazione sovrapposti. E' stato analizzato il consumo energetico per la climatizzazione e l'illuminazione del sistema AVF in questo scenario e confrontato con una serra verticale standard (VF) con ripiani fissi nelle stesse condizioni, comprese le specie coltivate, le condizioni termoigrometriche esterne e interne, i parametri di illuminazione e i sistemi di climatizzazione. È stato sviluppato un modello computazionale specifico e sono state eseguite simulazioni utilizzando varie strategie di programmazione.

L'algoritmo di calcolo è adatto a una generalizzazione diretta, a condizione che siano disponibili dati sperimentali adeguati relativi al  $LAI$  e alla relazione tra il tasso di crescita e le condizioni termohigrometriche di ciascuna coltura. I risultati indicano che

il sistema AVF consente una riduzione di circa il 22% del consumo energetico specifico (rispetto alla superficie coltivata totale) necessario per il controllo termoigrometrico rispetto al sistema VF, come si può vedere nella tabella 2.5. Ciò evidenzia il potenziale dei sistemi AVF di migliorare l'efficienza energetica e la produttività. Le prestazioni delle serre verticali rispetto alle coltivazioni indoor tradizionali sono riportate nella tabella 2.1. L'AVF può aumentare la superficie coltivabile (di oltre il 400% rispetto alla stessa quantità di terreno occupato dalle coltivazioni indoor tradizionali in piano) e contemporaneamente ridurre il consumo di risorse energetiche per la coltivazione. Per la VF, questo aumento è solo del 200%, il che significa che, grazie all'algoritmo di programmazione dei trapianti, l'AVF sfrutta il doppio della superficie rispetto alla VF. Utilizzando il modello di calcolo presentato, sono state effettuate diverse simulazioni, variando anche la programmazione della semina nella VF. I risultati mostrano che il consumo energetico del sistema AVF è ridotto di circa il 20% rispetto al VF, indipendentemente dalle strategie di semina impiegate. Ciò dimostra che la riduzione del consumo energetico non dipende in modo significativo dalla programmazione della semina, evidenziando che la tecnologia AVF può avere efficaci applicazioni industriali, sia in termini di ottimizzazione dell'uso del suolo che di efficienza delle risorse energetiche.

Nonostante i risultati promettenti del sistema AVF in termini di efficienza energetica e superficie coltivabile, nel capitolo di discussione 2.5 sono state evidenziate diverse limitazioni del presente studio (come la necessità di estendere l'analisi a diverse specie coltivate utilizzando dati specifici di crescita e traspirazione basati su misurazioni sperimentali). Nel complesso, i risultati di questo studio evidenziano il significativo potenziale dei sistemi AVF per migliorare la produttività e l'efficienza energetica nell'agricoltura urbana, aprendo la strada a future ricerche e sviluppi tecnologici verso soluzioni sostenibili.

Nello studio di identificazione parametrica white-box si è sfruttato il modello di calcolo agronomico e termoenergetico per risalire ai coefficienti delle curve di approssimazione del  $LAI$ . Sono state analizzate diverse approssimazioni: polinomiale, somma di seni, somma di tangenti iperboliche e funzioni in base radiale facendo variare il numero dei coefficienti in gioco. Questo studio nasce dalla necessità di integrare le simulazioni termoenergetiche della AVF con diverse colture essendo che in letteratura non sono riportati molti riferimenti ai Leaf Area Index. Avendo a disposizione un prototipo di sistema AVF accuratamente descritto dal modello sarebbe possibile andare a eseguire una stima dei  $LAI$  anche di diverse specie di piante in modo da ampliare le simulazioni di tale sistema. I risultati mostrano buone approssimazioni con queste



curve, in particolare la somma di seni con 60 coefficienti trova il minimo della funzione costo. Rimanendo in tema Serre Adattive Verticali, si è svolto uno studio preliminare sul sistema AVF come sistema di supporto vitale per missioni spaziali. In particolare, la possibilità di rendere modulare questa tecnologia, mediante alcuni adattamenti impiantistici che rendano possibile l'integrazione del sistema in ambienti come la stazione spaziale internazionale, consentirebbe di avere a disposizione una piccola serra portatile in grado di garantire il microclima ideale per la crescita delle verdure in ambienti ostili e difficili come quello spaziale. In questo studio sono state svolte simulazioni termoeconomiche, dopo aver rivisitato il sistema di climatizzazione della AVF e si è indagata la possibilità di recuperare acqua grazie a uno scambiatore di calore esterno denominato "cold plate" interfacciato con il circuito di raffreddamento della ISS. Si è mostrato che un singolo modulo adattivo con pianta 25x25 cm è in grado di recuperare 0.45L di acqua con un singolo ciclo di coltivazione di lattuga. Modificando il fotoperiodo di esercizio nel modulo AVF si è mostrato con il recupero possa essere esteso a 0.6L per 18h di fotoperiodo e 0.64L per 20h di fotoperiodo. In ultima analisi si è svolto uno studio comparativo sui fabbisogni energetici delle serre piane tradizionali e adattive. Dopo una breve analisi del modello di calcolo agronomico usato per la stima dei carichi termici e della evapotraspirazione delle piante si è svolto il confronto fra le due tipologie di serra. Dai risultati è emerso, anche in questo caso, che la serra adattiva mostra un vantaggio in termini di efficienza energetica, portando a una riduzione dei fabbisogni energetici primari. In particolare si è visto che a dicembre c'è una riduzione del 27% e a gennaio del 20%, questo grazie alla minimizzazione della superficie disperdente e ad una gestione ottimale della ventilazione del sistema.

In conclusione, i sistemi adattivi testati in questa ricerca offrono una risposta concreta alla necessità di decarbonizzare i sistemi alimentari urbani. La transizione dalle serre statiche a sistemi adattivi "volume-efficient" non solo riduce l'intensità energetica per unità di prodotto, ma abilita un'integrazione più profonda dell'agricoltura nel tessuto delle Smart Cities, trasformando la produzione alimentare da carico energetico a servizio ecosistemico integrato.

# Bibliografia

- [1] i-Grow. Coltivazione idroponica fai da te: come coltivare la tua pianta senza utilizzare terra. Disponibile online, 2025. Ultimo accesso: 18 novembre 2025.
- [2] La Gazzetta delle Koi. Acquaponica: la fitodepurazione utile. <https://www.lagazzettadellekoi.it/acquaponica-la-fitodepurazione-utile/>, 2024. Ultimo accesso: 18 novembre 2025.
- [3] Elsevier. Sciencedirect. <https://www.sciencedirect.com/>, 2025. Accessed: 2025-03-04.
- [4] Tessa Naus. Is vertical farming really sustainable. *EIT Food. Available online: <https://www.eitfood.eu/blog/post/is-verticalfarming-really-sustainable> (accessed on 18 July 2022)*, 2018.
- [5] Luigi Serio. Diagramma psicrometrico interattivo, 2024. Consultato il 23 febbraio 2026.
- [6] Wikipedia contributors. Agricoltura — wikipedia. [https://it.wikipedia.org/wiki/Agricoltura\\_intensiva?#](https://it.wikipedia.org/wiki/Agricoltura_intensiva?#), 2025. Ultimo accesso: 17 febbraio 2025.
- [7] European Conservation Agriculture Federation (ECAAF). Conservation agriculture and climate change. Technical report, ECAAF, 2021. Ultimo accesso: 17 febbraio 2025.
- [8] ANSA. Istat: agricoltura di precisione per il 28,5% delle aziende. [https://www.ansa.it/sito/notizie/economia/pmi/2024/05/27/istat-agricoltura-di-precisione-per-il-285-delle-aziende\\_17c1a0dd-6de0-4a55-981c-32a211a06931.html](https://www.ansa.it/sito/notizie/economia/pmi/2024/05/27/istat-agricoltura-di-precisione-per-il-285-delle-aziende_17c1a0dd-6de0-4a55-981c-32a211a06931.html), 2024. Ultimo accesso: 17 febbraio 2025.
- [9] Mordor Intelligence. Indoor farming market size, growth drivers, report analysis 2025–2030. <https://www.mordorintelligence.it/industry-reports/indoor-farming-market>, 2025. Ultimo accesso: 17 novembre 2025.

- [10] Swathi Erekaath, Holger Seidlitz, Monika Schreiner, and Christian Dreyer. Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. *Sustainable Cities and Society*, 106, 2024.
- [11] Md Shaha Nur Kabir, Md Nasim Reza, Milon Chowdhury, Mohammad Ali, Samsuzzaman, Md Razob Ali, Ka Young Lee, and Sun-Ok Chung. Technological trends and engineering issues on vertical farms: A review. *Horticulturae*, 9(11), 2023.
- [12] Jost Buscher, Julija Bakunowitsch, and Kathrin Specht. Transformative potential of vertical farming—an urban planning investigation using multi-level perspective. *Sustainability*, 15(22), 2023.
- [13] Alessandro Celestre, Giorgio Mina, Luigi Bollani, Giovanni Peira, and Alessandro Bonadonna. Vertical farming as a sustainable alternative for agriculture: The italian consumer point of view. *Biology and Life Sciences Forum*, 26(1), 2023.
- [14] Malek Al-Chalabi. Vertical farming: Skyscraper sustainability? *Sustainable Cities and Society*, 18:74–77, 2015.
- [15] Suha Elsoragaby, Azmi Yahya, Muhammad Razif Mahadi, Nazmi Mat Nawi, and Modather Mairghany. Energy utilization in major crop cultivation. *Energy*, 173:1285–1303, 2019.
- [16] Vahid Arabzadeh, Panu Miettinen, Titta Kotilainen, Pasi Herranen, Alp Karakoc, Matti Kumm, and Lauri Rautkari. Urban vertical farming with a large wind power share and optimised electricity costs. *Applied Energy*, 331:120416, 2023.
- [17] Marco Cossu, Maria Teresa Tiloca, Andrea Cossu, Paola A Deligios, Tore Pala, and Luigi Ledda. Increasing the agricultural sustainability of closed agrivoltaic systems with the integration of vertical farming: A case study on baby-leaf lettuce. *Applied Energy*, 344:121278, 2023.
- [18] Cecilia Stanghellini and David Katzin. The dark side of lighting: a critical analysis of vertical farms’ environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, page 142359, 2024.
- [19] Jiarui Liu, Azusa Oita, Kentaro Hayashi, and Kazuyo Matsubae. Sustainability of vertical farming in comparison with conventional farming: A case study in miyagi prefecture, japan, on nitrogen and phosphorus footprint. *Sustainability*, 14(2), 2022.

- [20] Chenglin Wang, Qiyu Han, Jianian Li, Chunjiang Li, and Xiangjun Zou. Yolo-blbe: A novel model for identifying blueberry fruits with different maturities using the i-msrcr method. *Agronomy*, 14(4), 2024.
- [21] Liang Gong, Bishu Gao, Yefeng Sun, Wei Zhang, Gengjie Lin, Zekai Zhang, Yanming Li, and Chengliang Liu. preciseslam: Robust, real-time, lidar-inertial-ultrasonic tightly-coupled slam with ultraprecise positioning for plant factories. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20(6):8818–8827, 2024.
- [22] T Blom, A Jenkins, RM Pulselli, and AAJF Van den Dobbelsteen. The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 377:134443, 2022.
- [23] P. Bagnerini, M. Gaggero, M. Ghio, F. Malerba, and M.A. Malerba. Adaptive vertical farm for fresh food production in orbital stations and future lunar settlements. In *Proc. Int. Workshop on Metrology for Aerospace*, pages 402–407, 2022.
- [24] P. Bagnerini, M. Gaggero, M. Ghio, and F. Malerba. The adaptive vertical farm as an efficient tool for the cultivation of multiple crops in space. In *Proc. Int. Workshop on Metrology for Aerospace*, 2023.
- [25] P. Bagnerini, M. Gaggero, and M. Ghio. Mixed-integer linear programming for the scheduling of seedings in an industrial adaptive vertical farm. In *Proc. Int. Conf. on Automation Science and Technology*, 2023.
- [26] Space V. Space v- plant the future. <https://www.spacev.bio/it/mission/>, 2023.
- [27] M. Ghio. System for the vegetable garden and nursery cultivation of plants. Italian Patent IT20200011161, 2020. Filed in Italy.
- [28] Francesco Orsini. Sistemi per vertical farming: valutazione tecnico-economica dell’adozione del sistema adattivo germina. Technical report, non pubblicato, 2022.
- [29] Zhonghua Huang, Xuejun Du, and Carlos Salvador Zepeda Castillo. How does urbanization affect farmland protection? evidence from china. *Resources, Conservation and Recycling*, 145:139–147, 2019.

- [30] Diana H Wall, Uffe N Nielsen, and Johan Six. Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528(7580):69–76, 2015.
- [31] A Arcasi, AW Mauro, G Napoli, F Tariello, and GP Vanoli. Energy and cost analysis for a crop production in a vertical farm. *Applied Thermal Engineering*, 239:122129, 2024.
- [32] Luuk Graamans, Andy van den Dobbelsteen, Esther Meinen, and Cecilia Stanghellini. Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153:138–147, 2017.
- [33] Cecilia Stanghellini. *Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management*. Wageningen University and Research, 1987.
- [34] C Brouwer and M Heibloem. Irrigation water management: irrigation water needs. *Training manual*, 3:1–5, 1986.
- [35] John L Monteith. Evaporation and environment. In *Symposia of the society for experimental biology*, volume 19, pages 205–234. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, 1965.
- [36] Till Weidner, Aidong Yang, and Michael W Hamm. Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 243:114336, 2021.
- [37] A. Arcasi, R. Mastrullo, A.W. Mauro, and A.M. Pantaleo. State of the art of evapotranspiration models for plant cultivation in open fields, greenhouse systems and plant factories. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385(1):012002, 2022.
- [38] David M Gates. Energy, plants, and ecology. *Ecology*, 46(1-2):1–13, 1965.
- [39] Jonathan M Frantz, Glen Ritchie, Nilton N Cometti, Justin Robinson, and Bruce Bugbee. Exploring the limits of crop productivity: beyond the limits of tipburn in lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(3):331–338, 2004.
- [40] I Alados, IY Foyo-Moreno, and L Alados-Arboledas. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and forest meteorology*, 78(1-2):121–131, 1996.

- [41] M Fuchs. Transpiration and foliage temperature in a greenhouse. In *Proceedings of the International Workshop on Cooling Systems for Greenhouses, Tel Aviv, Israel*, pages 89–98, 1993.
- [42] André Perrier. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. iii. Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Annales Agronomiques*, 26(5):529–556, 1975.
- [43] Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Fao, rome*, 300(9):D05109, 1998.
- [44] Francesco Tei, A Scaife, and DP Aikman. Growth of lettuce, onion, and red beet. 1. growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany*, 78(5):633–643, 1996.
- [45] Andree Tuzet, A Perrier, and R Leuning. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, 26(7):1097–1116, 2003.
- [46] Keiko Ohashi-Kaneko, Masahide Takase, Noya Kon, Kazuhiro Fujiwara, and Kenji Kurata. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environmental Control in Biology*, 45(3):189–198, 2007.
- [47] Jun Wang, Wei Lu, Yuxin Tong, and Qichang Yang. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*lactuca sativa* l.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in plant science*, 7:250, 2016.
- [48] RM Wheeler, CL Mackowiak, JC Sager, NC Yorio, WM Knott, and WL Berry. Growth and gas exchange by lettuce stands in a closed, controlled environment. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(3):610–615, 1994.
- [49] KC Shasteen and Murat Kacira. Predictive modeling and computer vision-based decision support to optimize resource use in vertical farms. *Sustainability*, 15(10), 2023.
- [50] Maryam Esmaili, Sasan Aliniaiefard, Mahmoud Mashal, Parisa Ghorbanzadeh, SEIF Mehdi, Miguel U Gavilan, Francisca F Carrillo, Oksana Lastochkina,

- and LI Tao. Co2 enrichment and increasing light intensity till a threshold level, enhance growth and water use efficiency of lettuce plants in controlled environment. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(4):2244–2262, 2020.
- [51] NV Royal Philips. Philips horticulture led solutions-greenpower led toplighting-high output, 2015.
- [52] Chung-Liang Chang, Yi-Ming Huang, and Guo-Fong Hong. Using a novel wireless-networked decentralized control scheme under unpredictable environmental conditions. *Sensors*, 15(11):28690–28716, 2015.
- [53] Han Gao, Zhi-Cheng Tan, Ming Yang, Cheng-Peng Ma, Yu-Fei Tang, and Fu-Yun Zhao. Microclimate air motion and uniformity of indoor plant factory system: Effects of crop planting density and air change rate. *Applied Sciences*, 15(8), 2025.
- [54] Godwine Swere Okochi and Ye Yao. A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (vav) air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59:784–817, 2016.
- [55] Jan Goudriaan and HH Van Laar. *Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises*, volume 2. Springer Science & Business Media, 2012.
- [56] Tian’ao Wu, Kaihua Liu, Minghan Cheng, Zhe Gu, Weihua Guo, and Xiyun Jiao. Paddy field scale evapotranspiration estimation based on two-source energy balance model with energy flux constraints and uav multimodal data. *Remote Sensing*, 17(10), 2025.
- [57] Constantinos A Balaras, Elena G Dascalaki, Ioanna Psarra, and Tomasz Cholewa. Primary energy factors for electricity production in europe. *Energies*, 16(1):93, 2022.
- [58] Ji Luo, Chuhao Zhao, Qiao Chen, and Guangqin Li. Using deep belief network to construct the agricultural information system based on internet of things. *J. Supercomput.*, 78(1):379–405, January 2022.
- [59] National Aeronautics and Space Administration. Ssp 41000 – capability: Condition atmosphere (temperature and humidity requirements) for the international space station cabin. Technical Report NASA/TP–2016–218228, NASA Technical Reports Server, 2016.

- [60] National Aeronautics and Space Administration. International space station user's guide. Release 2.0, NASA, Washington, DC, USA, 2000. Available at: <https://www.scribd.com/document/47571535/International-Space-Station-User-s-Guide> [Accessed: February 2026].
- [61] Trimble Inc. *SketchUp Pro*. Trimble Inc., Sunnyvale, CA, USA, 2024.
- [62] DuPont Teijin Films. *Mylar polyester film - General Properties*. DuPont Teijin Films, Chester, VA, USA, 2003. Technical Data Sheet, Physical-Electric-Thermal-Optical Properties.
- [63] Martin PN Gent. Factors affecting relative growth rate of lettuce and spinach in hydroponics in a greenhouse. *HortScience*, 52(12):1742–1747, 2017.
- [64] Ep Heuvelink, Cecilia Stanghellini, and Bert Van't Ooster. *Greenhouse horticulture: Technology for optimal crop production*. Brill, 2024.
- [65] Rangjian Qiu, Shaozhong Kang, Taisheng Du, Ling Tong, Xinmei Hao, Renqiang Chen, Jinliang Chen, and Fusheng Li. Effect of convection on the penman-monteith model estimates of transpiration of hot pepper grown in solar greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 160:163–171, 2013.
- [66] Youssef Rouphael and Giuseppe Colla. Modelling the transpiration of a greenhouse zucchini crop grown under a mediterranean climate using the penman-monteith equation and its simplified version. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(9):931–937, 2004.
- [67] S Pollet, P Bleyaert, and Raoul Lemeur. Application of the penman-monteith model to calculate the evapotranspiration of head lettuce (*lactuca sativa* l. var. capitata) in glasshouse conditions. In *XXV International Horticultural Congress, Part 9: Computers and Automation, Electronic Information in Horticulture 519*, pages 151–162, 1998.
- [68] Lu Zhang and Raoul Lemeur. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and penman-monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58(3-4):209–228, 1992.
- [69] EDMAr N FrANquErA. Leaf morphological characteristics of leaf lettuce (*lactuca sativa* l.) as affected by different colored plastic mulch. *Current Agriculture Research Journal*, 3(1):20–25, 2015.



- [70] Samuel Joe Acquah, Haofang Yan, Chuan Zhang, Guoqing Wang, Baoshan Zhao, Haimei Wu, and Hengnian Zhang. Application and evaluation of stanghellini model in the determination of crop evapotranspiration in a naturally ventilated greenhouse. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6):95–103, 2018.